
「DMSP/OLS を用いた広域地震災害被害想定 ・被災地推定手法の開発」

(研究課題番号 14380203)

平成 14 年度～平成 16 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書

京 都 大 学 図 書



1050572353

林春男氏寄贈

附 属 図 書 館

平成 17 年 3 月

研究代表者
京都大学防災研究所

林 春男

「DMSP/OLS を用いた広域地震災害被害想定
・被災地推定手法の開発」

(研究課題番号 14380203)

平成 14 年度～平成 16 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書

平成 17 年 3 月

研究代表者
京都大学防災研究所

林 春男

はじめに

“World at Night”というポスターをご存じだろうか。夜空の星のように都市光が分布している人工衛星が写した夜の地球全図である。このポスターを見たことが本研究のきっかけである。ポスターのもとになった映像を撮影したのが極座標をまわる DMSP と呼ばれる米国の軍事気象衛星である。本研究の目的は、DMSP が捉える夜間可視画像を利用して、今後予想される広域地震災害の事前の被害想定と、災害発生後の被害推定をシームレスに行うシステムを開発する事である。

DMSP の本来の目的は、昼夜を問わず全世界の雲の分布を把握し、米軍に提供することである。夜間におけるセンサー感度の高さから、都市光の把握が可能となっている。DMSP 衛星は、極軌道上から 0.5 日の回帰周期で 2.7km の解像度で、観測を行っている。1992 年以降継続的に日々得られる夜間可視画像を地震防災に役立てるシステムの開発を行ってきた。

都市光を自動的に抽出・モニターし、災害発生前には、都市光の強度と空間分布から、都市域における社会・経済活動の水準とその空間分布を推定し、予想される地震が引き起こす地震動の分布とあわせて、被害の想定を行う。また、ひとたび災害が発生した際には、得られる都市光の異常な変動に着目して、24 時間以内に被災地の同定を行う。このシステムにより、自国の現状を把握するための社会・経済統計や、高度な地震観測網が未整備である地域でも、事前の被害想定や、事後の被害把握が可能となる。米国やわが国のように地図情報が完備している国では奇異に思われるかもしれないが、世界には地図が整わない地域も多い。しかし、高精度な衛星写真を背景図と使い、DMSP によって地震被害ポテンシャルや被災地の推定を行うことは、世界の地震被害の低減に貢献できると考えている。

この研究は多くのパートナーの協力によってさせられてきている。慶應義塾大学の小檜山雅之博士、東京大学生産技術研究所の高島正典博士、東京海上日動火災の渡邊学君の協力に感謝する。彼らとの共同研究として進められた成果を、これからご紹介していく。

京都大学防災研究所

林 春男

研究組織

研究代表者： 林 春男（京都大学・防災研究所・教授）

研究分担者： 田中 聡（富士常葉大学・環境防災学部・助教授）

東田光裕（西日本電信電話株式会社兵庫支店・ソリューション営業部
県域 SI/SE グループ・主査）

高島正典（東京大学・生産技術研究所・日本学術振興会特別研究員）

研究協力者： 小檜山雅之（慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科・専任講師）

渡邊 学（東京海上日動火災保険株式会社・福岡中央支店博多支社）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	7, 100	0	7, 100
平成 15 年度	2, 600	0	2, 600
平成 16 年度	2, 200	0	2, 200
総 計	11, 900	0	11, 900

研究発表

(1) 学会誌等

- ・ 渡邊 学・林 春男・高島 正典他、地震災害の被害想定のための高解像度衛星画像・GPS ビデオカメラを用いた建物インベントリー推定手法の確立ーフィリピンのマリキナ市を事例としてー、地域安全学会論文集、No.6、pp.75-84、2004
- ・ 高島 正典・林 春男、DMSP 夜間可視画像における画素単位の観測値分布を考慮した都市光強度推定手法の提案、地域安全学会論文集、No.6、pp.85-94、2004
- ・ Masasuke TAKASHIMA, Haruo HAYASHI, Improvement of The Method to Estimate Relative Night-time City Light Intensity of The Highly Urbanized Area Considering The Fluctuation Of Observed Digital Number in DMSP Visible Imagery, Proceedings of The 25th Asian Conference on Remote Sensing, No25, pp.644-649, 2004
- ・ Manabu WATANABE, Haruo HAYASHI, Masasuke TAKASHIMA et al., Develepment Of a Seismic Risk Assessment Method By Estimating Building Inventory Using High Resolution Satellite Imagery Data And Digital Video Imagery Data with Geo-Locational Data, Proceedings of The 25th Asian Conference on Remote Sensing, No25, pp.250-255, 2004
- ・ Masasuke TAKASHIMA, Haruo HAYASHI, Damage Inventory Estimation For Large Scale Earthquake Disaster Assessment Using Night Time City Light, Proc. of The 13th World Conference of Earthquake Engineering, CD-ROM, 2004
- ・ 林春男、防災 C A L S の推進、日本建設情報総合センターJACIC 情報、第 18 巻、pp70-72、2003

- ・高島 正典 林 春男、夜間都市光分布を用いた広域の人口・建物棟数分布のモニタリング・東海地震の被害想定への適用、土木学会地震工学論文集、Vol.26、CD-ROM 版、2003
- ・M.Takashima・H. Hayashi, Monitoring Spatial Distribution of Population and Buildings using DMSP Night-time Imagery and Its Application for Earthquake Damage Assessment, Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, No27, CD-ROM 版, 2003
- ・林 春男、最近の防災研究の動向、学術月報（日本学術振興会）、Vol.56 No.7、2003
- ・高島正典、林春男、DMSP 夜間可視画像を用いた広域都市圏の同定と地震被害ポテンシャルの推定、地域安全学会論文集、No.4、pp151-158、2002
- ・村上則男、川方裕則、林春男、高島正典、強震観測記録と消防庁被害報告を用いた広域の地震被害推定と被害の及ぶ範囲の同定の手法ー2001年芸予地震への適用ー、地域安全学会論文集、No.4、pp95-104、2002
- ・下田渉、川方裕則、林春男、都道府県別の地震被害データに基づく被害地震発生の時空間パターンの同定、地域安全学会論文集、No.4、pp105-112、2002
- ・東田光裕、牧紀男、林春男、災害対応シュミレータの概念設計、地域安全学会論文集、No.4、pp41-48、2002

(2) 出版物

- ・林 春男、いのちを守る地震防災学、岩波書店、2003

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

なし

目 次

はしがき

1. 序論	pp.1-1 ~ 1-11
2. DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム(EDES)の 時系列画像法を用いた推定精度の向上	pp.2-1 ~ 2-13
3. 広域地震被害想定における被害ポテンシャル把握の現状と DMSP/OLS 夜間可視画像の利用可能性の検討	pp. 3-1 ~ 3-12
4. 測定論にもとづく都市光分布モデル作成手法の提案	pp. 4-1 ~ 4-18
5. 測定論モデルを用いた都市圏の同定と人口・建物棟数の推定手法	pp. 5-1 ~ 5-14
6. DMSP夜間可視画像における画素単位の観測値分布を考慮した 都市光強度推定手法の改良	pp. 6-1 ~ 6-12
7. 夜間都市光分布を用いた広域の人口・建物棟数分布のモニタリング 東海地震の被害想定への適用	pp. 7-1 ~ 7-9
8. GPS 付ビデオカメラと高解像度衛星を用いた建物インベントリーの推定	pp. 8-1 ~ 8-18
9. まとめ	pp. 9-1 ~ 9-2

補 注

謝 辞

参考文献

主要発表論文

1. 序論

どのような防災対策も、災害による被害を極小化することを目的として実施される。よって、防災対策の実施に関する意思決定を合理的に行うためには、どのような自然災害の危険が存在し、その自然災害が発生した場合にどのような被害が生じるのかを予測する必要がある。また、実際に自然災害が発生した後においても、新しく生じた環境にうまく適応するためには、どのような被害が生じているのかを推定・把握する必要がある。

多くの災害研究において、自然災害による被害は、社会システムに地震などの自然外力が及ぶことにより発生すると捉えている。この考え方にもとづけば、自然災害が発生した場合にどのような被害が生じるのかを予測するためには、どのような社会システムが存在し、その社会システムにどのような自然外力が及ぶのかを把握すること、そして、自然外力が及んだ結果、社会システムにどのような変化が生じたのかを推定することが必要となる。また、実際に生じている被害を推定・把握するためには、自然外力が及んだ社会システムの現状を知ることが必要となる。発生しうる自然外力の把握、また、自然外力が社会システムに及んだ結果生じる物理的な被害の推定に関しては、従来、数多くの研究が行われてきた。その一方で、どのような社会システムが存在するのか、また、自然外力が及んだ結果、社会システムにどのような変化が生じたのかの把握・推定に関する研究は少なく、方法論の確立・体系化が求められている。

寒川（1992）、石橋（1994）によれば、歴史的に日本は南海・駿河トラフを震源域としたプレート境界型地震に 100 年～150 年周期で襲われている。宇佐美（1996）によれば、歴史的にこれらの地震はいずれも、南関東から九州に至る広域にわたって大きな被害をもたらしている。現在、日本が直面しているのは、昭和の東南海地震の際に歪みが開放されずに残り、1978 年に大規模地震対策特別措置法の制定以来、その発生が警戒されている東海地震、そして、次の発生時期を迎えつつある、東南海地震、南海地震である。中央防災会議・東海地震対策専門調査会（2002）が指摘しているように、東海地震に関しては、いつ発生してもおかしくないとされている。また、地震調査研究推進本部（2001）では、2030 年までに次の東南海地震が発生する確率を 50%、南海地震の発生する確率を 40%と推定しており、対策が急がれている。林（1999）が指摘したように、来るべきこれらの地震は、近い将来に日本の社会・経済活動が集中する太平洋ベルト地帯全体を襲うという意味で、国の行く末を左右しうる災害である。林（1999）、能島（1999）が指摘したように、各地方自治体が自分達の地域に関してのみどのような被害が発生するのかを予測し、個々に対策を講じるのではなく、被災地全体として被害の予測を行い、全国的な視野で必要な対策を講じていく必要がある。その場合、広域にわたる被災地全体について、社会システムの状態に関する均質な情報が提供される必要がある。また、発生までの 30 年前後の間には、社会の状況も大きく変化することが予想される。よって、その間の、社会システムの現状や防災対策の成果をモニターし、被害想定結果を見直していく必要がある。歴史的に南海・東南海地震発生前の 50 年間と後の 10 年間には、直下型地震が比較的活発に発生することも知られている。予期できぬ地震に対し、早期被害推定システムが有効に機能するためにも、社会システムの現状を常に把握し、早期被害推定システムに反映させる手法が必要である。実際に南海・東南海・東海地震が発生すれば、その被害は空間的に広域にわたるだけでなく、時間的にも長期間にわたって影響が波及することが予測される。各地

の被災地の復旧・復興がどの程度進んだかを定量的かつ継続的に評価できる必要がある。

少なくとも先進国では、社会・経済統計調査、社会調査、リモートセンシングといった様々な方法で、社会システムの状態に関するデータの収集が数多く行われている。しかし、これらの調査・観測は、防災への利用だけを目的として、実施頻度、集計単位等が設計されているわけではなく、得られるデータもそのまま被害の予測／推定・把握に利用可能な形式になっているとは限らない。また、特に広域災害を対象とした場合、防災への利用だけを目的とした社会システムに関する新規の調査・観測は、コストの面で困難であることが多い。よって、既存の調査・観測によって収集されるデータを加工し、防災に利用可能な形にする方法論を明らかにすることが、災害前後における社会システムの状態の把握につながるといえる。

発展途上国においては、ただでさえハードウェアによる防災対策が未整備で、災害脆弱性が高いにもかかわらず、社会・経済統計調査が未整備であるために、事前の被害の予測や、事後の被害の推定・把握が困難であることが多い。冒頭に述べたとおり、事前の被害の予測や、事後の被害の推定・把握はどのような災害対策、災害対応を行うかを決定する上で必要不可欠であり、社会・経済統計調査が未整備である地域においても適用可能な方法で、社会システムの状態の把握を可能にすることが発展途上国における災害脆弱性の低減の第一歩となり得る。

このように、社会システムの現状をできるだけ高解像度で、継続的に、地域を問わず均質に把握する手法が、防災上、求められている。衛星リモートセンシング技術は、全球を対象とする継続的な観測データをもとに、先進国・発展途上国を問わず、社会システムの状態に関する均質な情報を提供できる可能性を秘めている。そこで、本研究では、夜間に都市が発する光を捉えた DMSP 夜間可視衛星画像を用いて、災害前後の社会システムの状態に関する情報を、グローバルに、継続的に、かつ、均質な形で提供する手法を提案するとともに、過去に実際に発生した災害を事例として、その手法の被害の予測・推定への適用例を紹介する。さらに、その手法の被害の予測・推定への適用例として、21 世紀前半に発生が危惧されている南海トラフを震源とする地震の被害想定を行う。本章では、まず、本研究における自然災害による被害の発生の概念モデルを示す。次に自然災害による被害の定量的な予測、推定・把握における課題を整理し、本研究の位置づけについて述べる。

1.1. 自然災害による被害の発生の概念モデル

UNDRO (1979) , Blaikie (1994) , 太田 (1994) , 林 (2001) など多くの災害研究では、自然災害による被害は、ある脆弱性をもつ社会システムに地震などの自然外力が及ぶことにより発生すると捉えている。Mileti (2001) では、自然災害による被害は、地震などの自然外力環境 (Physical Environment) , 自然外力環境にさらされるコミュニティの社会的・人口統計学的特徴 (Social and Demographic Characteristics of the Communities) , そして、建物、道路、橋等々の人工物環境 (Built Environment) の交互作用によって発生すると捉えている。この考え方は、先の自然外力-社会システムモデルのうち、社会システムを構成する要素の中から、自然外力との直接的な接点となる人工物の存在を特に明示したものと捉えることができる。自然外力環境、および社会システム全体との関係から考

えて、人工物環境には次の2つの役割があると考えられる。1つは社会システム内における自然環境との接点としての役割である。Burton (1993) が指摘しているように、人間は社会・経済的活動を行う上で、自然環境から、太陽エネルギー、水、大気、土壌、化石燃料、鉱物等々の資源を得ている一方で、渇水、洪水、異常な気温の低下・上昇、地震、火山噴火等々の危険にもさらされている。例えば、ダムは、その貯水機能によって、下流に流れる水量を調節し、洪水あるいは渇水を防ぎ、常に安定した水量を確保する役割を担っている。このように、人工物環境には、自然環境を人間にとって安全あるいは有益な形に変換して社会システムの中に取り込むフィルターとしての役割もあると考えられる。2つ目は、直接的に社会・経済的活動を支える役割である。例えば、高速道路、鉄道、空港・港湾、電話、インターネットなどは、社会・経済的活動の中で行われる人やモノ、情報の移動を支えている。また、様々な機械、計算機が社会・経済活動の中で行われる生産活動を支えている。1つの人工物がこれら二つの役割を同時に果たすことも多い。例えば、家は、雨風、暑さ・寒さから住人とその財産を守ると同時に、娯楽・安らぎの場を提供している。

以上の考察にもとづき、本研究では、自然災害における被害発生のおくみを図1-1のようにモデル化する。システムの中で活動を行う主体である人間そのものの存在も明示したのは、自然災害による人的被害とそれが社会・経済活動にもたらす影響を記述するためである。社会システムの中では、人間が、人工物環境と自然環境から得た資源を使って、様々な社会・経済活動を行う。自然環境で異常な外力が発生すると、その外力に接する人工物環境が破壊され、社会・経済活動を行う主体である人間にも被害が発生する。これらの被害を本研究ではそれぞれ、物的被害、人的被害と呼び、両者を総じてストック被害と呼ぶことにする。ストック被害に起因して、社会・経済的活動が影響を受ける。例えば、ライフラインが機能を復旧するまでは、社会全体の機能が麻痺する。また、稼ぎ手を失った家計は、新たに収入源を確保するまで、支出を控えなければならない。また、取引先の会社が被災すれば、別のルートで必要な品物を入手するまで、生産活動を一時的中断せざるを得ない。住まいを失った家計は、新しい住まいを確保するまで不安定な生活を強いられるだろう。様々な原因から、被災後長期にわたって、生産・消費活動が停滞し、生活の質・安定度が低下することが予想される。これらの影響を、フロー被害と呼ぶことにする。ストック被害の発生が自然外力の消失と共に止まるのに対し、フロー被害はその後長期間にわたり残存することが予想される。社会システムの中の人間、人工物環境、社会・経済的活動は、それ自体が、災害発生時にストック被害やフロー被害となる危険をはらんでいる。そこで、本研究では災害発生前における社会システム内の人間および人工物環境をストック被害ポテンシャル、社会・経済的活動をフロー被害ポテンシャルと呼ぶことにする。

1.2. 自然災害による被害の定量的な予測、推定・把握における課題

林 (1995) あるいは Tierney (2001) では、防災対策は、時間軸に沿って、被害抑止 (Mitigation)、被害軽減 (Preparedness)、事後対応 (Response) そして復旧・復興 (Recovery) の4つに分類できるとしている。各防災対策のフェーズ毎に、必要となる被害の情報は異なる。図1-2は、ストック被害、フロー被害の時間変化の概念モデルと、災

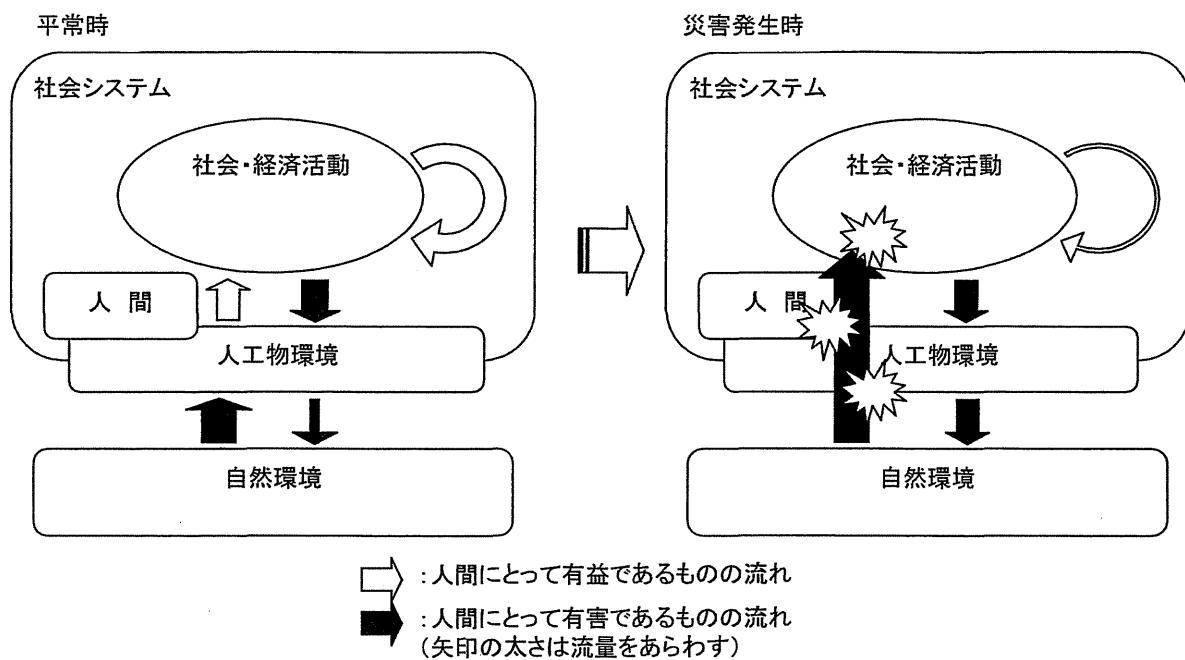


図1-1 自然災害発生の概念モデル

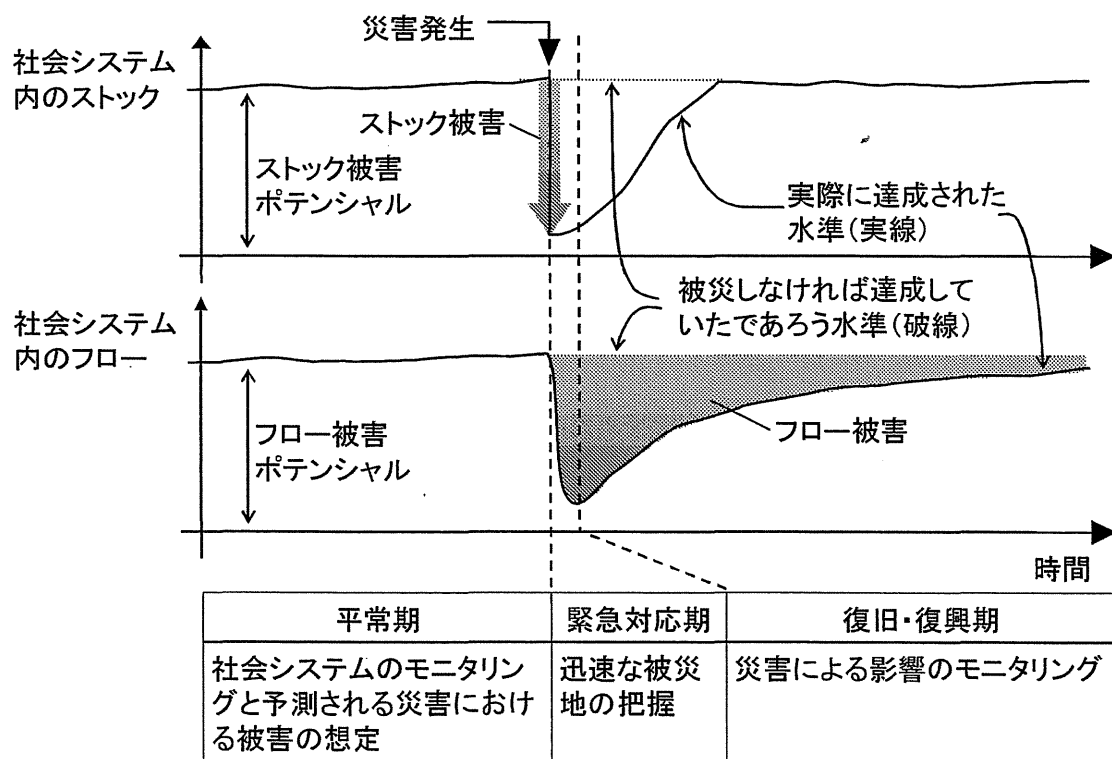


図1-2 災害発生前後の各フェーズで防災上必要となる被害の予測、推定・把握手法

害発生前後の各フェーズで防災上必要となる各被害の予測、推定・把握手法を整理したものである。以下、図 1-2 に沿って、災害発生前後における被害の予測、推定・把握の課題を整理する。

1.2.1. 災害発生前の被害の予測における課題

災害が発生発生した場合に、どのような被害が発生しうるのか、という情報は、被害抑止のためにどの地域から優先的に建物・社会基盤施設の耐災性を向上させていくか、被害軽減のために、どのような物資をどのくらい用意する必要があるのかということを決断する際の根拠となる情報である。このように、被害抑止、被害軽減といった災害発生前にとられる防災対策決定の際に参考にするため、被害全体の概要を予測することは、一般に被害想定^{補注(1)}と呼ばれ、国、地方自治体を中心に行われている。被害想定の詳細に関しては、2.において詳述するが、既存の被害想定^{補注(1)}の課題として次の3点を挙げたい。

1つは、想定の対象となる被害が、死傷者、建物・施設の倒壊といった、ストック被害に偏っている点である。わが国の各都道府県・政令指定都市における被害想定内容を見ても、ライフラインや交通網の途絶による影響を評価するものはあるものの、それらの施設が復旧した後のフェーズにおける社会・経済的影響の時系列に沿った評価は行われていない。フロー被害が想定項目としてあげられていないのは、そもそも過去の災害におけるフロー被害を定量的に評価する手法が確立されていないことに起因している。この問題については、次節において詳述する。

2つ目の問題点は、広域にわたって高解像度で被害ポテンシャルの現状を把握する手法がないことである。被害ポテンシャルの有り様が、時間と共に変化する以上、被害想定結果はその実状に合わせて更新する必要がある。しかし、2.2.において詳しく述べるが、地震災害を考えた場合、地震外力の推定手法に関わる調査・研究に比べ、被害ポテンシャルのあり様を推定・把握するための方法論はあまりに未発達である。特に南海・東南海地震のような被災地が広域にわたることが予想される地震災害を想定する場合、その被災地全体で均質な情報を整備できる必要がある。広域地震被害想定の場合、現時点では、社会システムの有り様に関する情報を、国勢調査および事業所統計のメッシュ統計にもとづいて得ることが多い。しかし、これらのメッシュ統計自体が、5年に一度、2年のタイムラグで更新・公表されている。そのため、最小でも2年前、最大7年前のデータをもとに想定を行うことになる。表 1-1は、社会・経済統計の集計単位と更新頻度、公表までのタイムラグの関係を示したものである。一般に、社会・経済統計の集計単位と更新頻度、タイムラグとはトレードオフの関係にある。どれだけ自然外力の推定が精度良く行われていても、社会システムについては集計単位の解像度が細かければデータの新鮮さを、またデータが新しければ、解像度の細かさをあきらめざるを得ない。よって、南海・東南海地震のような広域地震災害に関して、妥当な被害想定結果を得るためには、被災地となりうる地域の社会システムの現状に関して、どれだけ高解像度かつ高頻度で、かつ均質な情報を得られるかが重要な課題である。

近年では、発展途上国においても、地震災害に対する被害想定が行われるようになってきている。1990年から10年間、国連が行ってきたRADIUSプロジェクトでは、近年、成長が著しい発展途上国の諸都市の地震災害リスクの軽減を目的として、バンドン（インドネシア）、ティファナ（メキシコ）等、世界の9つの都市における地震被害想定を行っ

表1-1 社会・経済統計の集計単位と更新頻度、公表までのタイムラグ

社会・経済統計	集計単位	更新頻度	タイムラグ
各都道府県・市区町村の統計年鑑・月報等	都道府県・市区町村	1ヶ月～2年	1ヶ月～2年
商業統計産業編(都道府県表)	都道府県	1年	1年
工業統計表(都道府県別表)	都道府県	1年	1年
商業統計産業編(市区町村表)	市区町村単位	1年	1年
工業統計表(市区町村表)	市区町村単位	1年	2年
商業統計メッシュ統計	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	3年	2年
工業統計メッシュ統計	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	2年または3年	3年
国勢調査メッシュ統計	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	5年	2年
事業所・企業統計調査	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	5年	2年
DMSP	約0.9kmメッシュ	1日	数時間～24時間

表1-2 これまでに著者が行ってきた研究と各研究における社会システムの状態を測る指標およびその特性

社会システム の状態を測る 指標	集計単位		被害想定	被災地推定	復旧・復興状 況の把握
	空間	時間*			
産業連関表	都道府 県・ 政令市	5年 (2年)	—	—	高島・林 (1997)
電力消費量	営業所	1ヶ月 (1ヶ月)	—	—	高島・林 (1999) Takashima・ Hayashi (2000)
DMSP夜間 可視画像	0.9km メッシュ	1日 (3時間)		高島・林 (2000)	

*()内は公表までのタイムラグ

ている。しかし、自国の被害ポテンシャルを把握する社会・経済統計を整備できる国は、一部の先進国に限られており、被害想定をおこなう上で、いかにして正確で詳細な社会システムの情報を集めるかが、発展途上国にとって大きな課題となっている。また、RADIUS プロジェクトや、GESI プロジェクトのように、グローバルな視点から、災害の軽減を考える場合、優先的な支援を行う地域の優先順位の合理的に決定する必要がある。自然外力に関しては、GSHAP のような、5km メッシュ単位のグローバルな地震危険度マップがある一方で、同等の解像度で、時間と共に変化するグローバルな社会システムの状況を把握する方法論は確立されていない。

3 点目は、人間の営みの空間的連続性が考慮されていない点である。従来、地方自治体が行ってきた被害想定は、基本的に各自治体の行政界内のみを想定対象としている。しかし、本来、人間の営みはいわば“都市圏”とよばれる一定のある連続的な空間的広がり単位として成立している。ある都市圏の一部が災害に見舞われれば、その都市圏全体が影響を受ける可能性がある。その意味で、同一の都市圏に属する人間の営みは運命共同体であり、被害想定もそのような空間的広がり単位として行われるべきである。そのためには、都市圏を同定し、その変化を把握する手法の開発が不可欠である。

1.2.2. 災害発生後の被害の推定・把握における問題

災害発生後において、どのような被害が発生しているのかという情報は、実際にどの地域に支援隊を送り込むべきなのか、どの程度の避難所あるいは公営住宅を用意しなければならないのか、あるいはどの程度の人々が不安定な生活を強いられているのか等々、どのような緊急対応、復旧・復興施策を実施すべきかを決定する根拠となる。よって、災害発生後においては、いかに早く被害の現状を把握するかが大きな課題となりうる。

地震防災の分野に着目すると、緊急対応を支援するための、被害の現況の推定・把握手法は大きく 2 つの手法に分けられる。1 つは早期被害推定システムである。早期被害推定システムとは、地震発生直後に、地震計ネットワークに観測された実際の地震動にもとづいて、実際に発生している被害の推定を行うものである。このようなシステムの実例としては、JR の UrEDAS-HERAS (中村 (1996))、米国カリフォルニア州の CUBE-EPEDAT (Eguchi, R. et al. (1994))、東京ガスの SIGNAL (山崎・片山・野田・吉川・大谷 (1995))、兵庫県のフェニックス防災システム、横浜市のリアルタイム地震防災システム、川崎市の震災対策支援システム、内閣府防災部門の地震被害早期評価システム (EES) などがある。しかし、これらのシステムは、自然外力の現状把握の手段は提供されているが、社会システムの現状把握の手段が提供されていないという意味で、既存の被害想定と同じ問題を抱えている。2 つ目は、人工衛星画像や空撮映像・画像を用いて、被害そのものを直接把握しようとする手法である。例として、小川・山崎 (2000)、長谷川・山崎・松岡 (2001)、松岡・山崎・翠川 (2001)、青木・松岡・山崎 (2001)、松岡・山崎 (2002) などが挙げられる。

一方、復旧・復興を支援するための、被害の現況の推定・把握手法に関する研究としては、産業復興計画 (1995)、豊田・川内 (1997)、陳 (1997) が挙げられる。これらの研究では、経済の視点から阪神・淡路大震災におけるフロー被害の推定・把握を試みているが、フロー被害の発生期間を与件とする、あるいは被害額の算出を被災後のある時点のみで行うなど、フロー被害の時間的推移を推定・把握するまでは至っていない。フロー被

害の把握を困難にしている要因として次の 2 つが考えられる。1 つは、そもそもフロー被害、あるいは災害がもたらす社会・経済的影響の内容の複雑さがある。例えば、阪神・淡路大震災神戸市災害対策本部（1996）は、1995 年に発生した阪神・淡路大震災から 1 年後の時点における被害の概要をまとめているが、その最後の項目に、次のような記述が見られる。

⑩その他

上記の直接的被害にとどまらず、避難所生活の長期化、それに伴う精神的疲労や子供・高齢者、障害者等への心理的影響、学校等教育機能の低下、ライフラインの復旧の遅れ・交通渋滞などによる不便な生活の長期化や都市機能の低下、雇用の不安定化など市民の生活に対する震災の影響は様々な面に現われた。

また、産業面においても、企業の市外への移転や被災による生産量の低下、港湾施設の被害に伴うコンテナ貨物の他港へのシフト、高速道路の寸断や復旧工事による交通容量の不足などにより、神戸のみならず日本経済へ深刻な影響を及ぼした。

さらに、大量の災害廃棄物処理の長期化や、これに伴う環境への影響など、震災がもたらした被害は広範囲で多方面にわたる深刻なものとなった。

（阪神・淡路大震災神戸市災害対策本部（1996））

この記述に見られるように、震災がもたらした被害は広範囲で多方面にわたっており、また互いに複雑に影響し合っている。また、「生活の質」あるいは「生活の安定度」といった、従来の社会・経済統計では直接捉えられないような被害も含まれている。もう 1 点は、災害が行政界と無関係な空間分布で発生することにある。行政界を集計単位とした従来の社会・経済統計が、行政界とは無関係に出現する被災地の状況を必ずしも的確に捉えているとは言い難い。図 1-2 に従えば、フロー被害は、災害がなければ得られていたであろう生産・消費活動の水準あるいは生活の質・安定度といったものと、災害後に実際に得ているそれとの差によって定義できる。これは、フロー被害を把握するためには、災害後の生産・消費活動の水準や生活の質・安定度を何らかの形で時系列的にモニターする必要があることを示している。現在、フロー被害とくらべ、自然外力あるいはストック被害の予測、推定・把握がはるかに進んでいるのは、地震動を日夜観測・記録し、過去の地震災害におけるストック被害を記録して、両者の関係を分析してきたからである。その意味で、フロー被害を定量的に把握する手段がないことは、復旧・復興の場面で、フロー被害の情報を提供できないだけにとどまらない。それは、今後起きる災害に関して、フロー被害とストック被害や社会システムの特徴との関係を分析できず、将来発生する災害におけるフロー被害の予測もできないことを意味している。

1.3. 災害発生前後を通じた社会システムの状態の把握に向けて

1.2.1., 1.2.2. で見てきたように、自然環境の予測、推定・把握に比べ、社会システム

すなわち人工物環境や人口の分布、生産・消費活動の水準や生活の質・安定度を把握する手段は非常に遅れている。被害想定をより社会システムの現状を反映させたものにするためにも、またフロー被害を定量的に把握し、将来の災害におけるフロー被害の推定につなげるためにも、災害発生前後における社会システムの状況に関する均質な情報を把握する手法を確立する必要がある。このニーズに応えるため、筆者は社会システムによるエネルギーの消費に着目した。電力消費量や都市光強さの変化は、そこにおける社会・経済活動の水準の変化を反映し、長期的に安定して存在する電力消費量や都市光は、人間とその活動を支える恒久的な人工物環境の存在を反映するはずである。

表 1-2に、このような視点から、著者が行ってきた研究と、各研究における社会システムの状態を測る指標とその特性を示す。高島・林・河田（1997）では、産業連関表を用いて被災地で発生する間接被害を推定する手法を研究した。産業連関表は、ある地域社会の構成員がどのような関係の下で、経済活動を行っているのかを把握するのに適しているが、集計の単位が県・政令市であり、作成される頻度が低く、公表までの2年を要するため、行政界にとらわれない布置を持つ被災地の、現時点の状況をより早く知りたいという防災上のニーズに必ずしもそぐうものではない。この研究は、その後、著者が、フロー被害の空間的な広がりを、いかにして高頻度、高解像度で捉えるかということに目を向けるきっかけとなった。高島・林（1999）、Takashima・Hayashi（2000）では、フロー被害の時空間的な広がりを、電力消費量推移から営業所エリア毎に、月単位で評価する手法を構築した。この手法を、阪神・淡路大震災（Jan.1995）に適用した結果、兵庫県内で生じた機会損失（1998年11月の時点で1.85兆円）とともに、復興の遅れは主に第2次産業の停滞によること、また、神戸市の中心部が大きな負のインパクトを受ける一方、神戸市郊外では逆に正のインパクトが生じているといった、フロー被害の空間的な広がりと、その時間的な推移が明らかになった。電力消費量データを用いることで、空間的には営業所エリア単位で、時間的には月単位でフロー被害の時空間的な広がりを把握できるようになった。これよりもさらに高解像度、高頻度で社会システムの状態を把握する指標として筆者が着目したのが、米国の軍事気象衛星DMSP（Defense Meteorological Satellite Program）が捉える夜間の都市の光である。

1.4. 社会システムの状態をモニタリングする指標としての都市光分布

DMSP 夜間可視画像を防災場面に初めて利用したのは、Hayashi et al.（2000）、小檜山・他（2000）の研究グループである。彼らは、DMSP 夜間可視画像が、都市光という形で、人間の営みを捉えていること、1.0日の回帰周期により、地球上の任意の地点を毎日観測可能であることに着目して、この画像を利用した早期被災地推定システム（EDES）を構築した。EDESでは、災害により被害が発生すれば、人間の営みの存在を示す都市光にも何らかの変化が現れると考え、被災地周辺に関する災害発生前後の2画像の差分を取り、都市光の減少が有意であるピクセルを被災地として判定するという手法が用いられている。著者は、高島・林（2000）において、Hayashi et al.（2000）、小檜山・他（2000）が提案する、被災地推定手法の検証を行った。具体的には、Hayashi et al.の手法に基づくトルコ・マルマラ地震（1999年8月）と阪神・淡路大震災の被災地推定結果を、筆者が現地

で行った調査の結果や、既存の種々の被害分布データと照合し、Hayashi et al.の手法の信頼性を明らかにした。

もし、災害によって社会システムが受けた被害が、都市光の急激な減少となって現れるのであれば、普段の都市光の強さは、社会システム内のフローやストックの大きさをあらわしているはずである。本研究の目指すところは、この DMSP 夜間可視画像が捉える都市光を、災害発生直後だけでなく、平常時や、復旧・復興期の社会システムの状態の把握にも利用することである。DMSP 夜間可視画像の本来の目的は、米軍へ気象情報を提供するため、夜間月光に照らされる雲の分布を捕捉することであるが、Croft (1978) は、この夜間可視画像に、都市の灯り、焼畑の炎、イカ釣り漁船の誘魚灯といった、人間の営みを源とする光が映っていることを指摘し、人間の営みの分布を捉える手段の一つとして、DMSP 夜間可視画像の利用可能性を示唆した。その後、Welch (1980)、中山他 (1993)、Elvidge et al. (1997)、Konami et al. (1998)、Elvidge et al. (1999)、Nakayama and Elvidge (1999) らが、DMSP 夜間可視画像からの都市光の抽出を試みるとともに、抽出された都市光分布と人口、GDP、電力消費量との関係を分析し、それらの間に強い相関関係があることを明らかにしている。表 1-2 の最下段に示したとおり、DMSP 衛星は地球上の任意の地点を毎日観測することができ、観測データは 0.9km メッシュの解像度で提供される。この解像度は、わが国の国勢調査や事業所統計の 1km メッシュ統計の空間解像度とほぼ一致する。DMSP 夜間可視画像から抽出される都市光とこれらの社会・経済統計の間に有意な関係があるのであれば、従来にない高頻度かつ高解像度でグローバルに社会システム内のストック・フローの状態を把握することが可能になる。このことは、社会・経済統計の整備の遅れている地域にも被害想定の機会をもたらし、南海・東南海・東海地震のような広域地震災害を想定する際にも、行政界を越えて、均質な被害ポテンシャルの情報を提供し、また、被災地の復旧・復興状況をモニタリングする手段を提供することにもつながるのである。

このように、DMSP 夜間可視衛星画像が捉える都市光には、災害発生前、発生直後、そして復旧・復興期における社会システムの状態をシームレスにかつ定量的に捉えることができる可能性がある。すなわち、災害発生前においては、ストック被害ポテンシャルの量を都市光強度から推定し、災害発生直後においては、都市光強度の低下量からストック被害の大きさを推定する。また、復旧・復興期においては、フロー被害の収束状況を追跡し、被災地の復旧・復興状況のモニタリングを行う。この DMSP 夜間可視画像が捉える都市光強さは、これまでの研究の中で、最も高頻度、高解像度でグローバルな社会システムの状態を測りうる汎用性の高い指標と位置付けられる。

1.5. 本研究の目的・概要

以上のような背景を踏まえ、本研究では、災害発生前後を通して社会システムの状態をモニタリング可能な指標として、米国の軍事気象衛星 DMSP が日々捉える地表面夜間可視画像を利用して、災害前後の各フェーズにおいて必要となる情報を推定する手法を提案・改良する。

本報告の構成は以下の通りである。1. (本章) では、本研究の背景と目的について述

べた。2.では DMSP 時系列画像を用いて早期被災地推定システム (EDES) の精度向上を図る。3.では広域地震被害想定プロセスの概要とそこにおける本研究の位置づけ、および広域地震被害想定に求められるストック被害ポテンシャル推定手法のスペックについて述べるとともに、DMSP 夜間可視画像の、ストック被害ポテンシャルのモニタリングへの利用可能性を検討する。4.では、従来の DMSP 夜間可視画像からの都市光抽出手法の防災利用上の問題点を整理し、その問題点を克服した都市光抽出手法の提案を行う。また、本研究の都市光抽出手法にもとづいて抽出された都市光分布が、従来のものと同等あるいはそれ以上の都市捕捉率を持っていることを示す。5.では、4.で提案した都市光抽出手法に基づく都市光モデルを用いて、都市圏の同定手法を提案する。さらに、日本の各都道府県の被害想定において想定項目としてあげられている建物被害と人的被害の想定を可能にするため、人口と建物棟数の推定手法を提案する。6.では、4.で提案した手法では DMSP/OLS センサーのゲインの上限により飽和する傾向にあった都市中心域における都市光強度の違いを把握するため、DMSP 時系列画像データにおける画素単位の観測値分布を考慮してゲインの上限がかなった場合に観測されていたであろう相対的な都市光強度を推定する手法を提案する。7.では、5.で提案した都市圏同定手法および人口・建物棟数推定手法の適用例として、既存の地震外力推定手法および被害率関数を組み合わせて、日本が最も警戒すべき地震の一つである東海地震が 2000 年に発生した場合の被害想定を行う。8.では、DMSP 画像を用いた被害想定により大きな被害が発生する地域が明らかとなった際に、その地域についてより詳細な被害想定を行うためのインベントリーデータを高解像度衛星画像を用いて推定する手法を提案する。9.は結論である。

2. DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム (EDES) の時系列画像法を用いた推定精度の向上

2.1. はじめに

著者らは、米国の気象衛星 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) に搭載されたセンサ Operational Linescan System (OLS) により観測された夜間観測画像を用いて被災地分布の推定を行い、インターネットを通じ情報提供を行う早期被災地推定システム EDES (Early Damaged Area Estimation System) の開発を目指している。EDES は被災地分布等に関する地理情報を提供し、政府・自治体や NPO, NGO による災害対応活動を支援することを主目的としている。特に、地震災害危険度が高いにもかかわらず高密度の地震観測網が整備されていない国々を対象としており、著者らはこれまでに 1999 年トルコ・コジャエリ地震、1999 年台湾集集地震、2001 年エルサルバドル地震、2001 年インド西部地震の被災地推定を行い、インターネットによる情報発信を続けてきた。

これらの被災地推定を行った中、DMSP/OLS 画像の特性の分析と、被災地推定結果と実被害との比較検証を通じ、推定精度の限界が次第に明らかとなった。また一方で、2000 年 7 月より農林水産省の農林水産衛星画像データベースシステム (SIDaB) がアジア地域の DMSP 観測画像のインターネットによる提供を開始し、容易に多時期の画像解析が行えるようになった。

本論では、既往の推定手法の推定精度の問題を明らかにするとともに、この問題を克服し推定精度の向上を図るため、時系列画像に基づく新たな被災地推定手法の提案を行う。

2.2. 被災地推定手法の定式化

2.2.1. DMSP/OLS による都市光観測画像

EDES は都市光の地震前後の著しい変化を捉えることで被災地を推定している。ここで、人工衛星により都市光を観測するときの平常時の変動要因として下記のものが挙げられる。

- ・光源の非定常性 (例：ビルの窓の光など)
- ・光源の指向性と衛星の観測角度の変化 (例：ビルの側面と真上から・の観測の違い)
- ・大気・雲による都市光の散乱・吸収
- ・雲による周辺の都市光や月光の散乱・反射
- ・地表面の月光の反射
- ・長期的な観点での光源の増減 (都市の成長、衰退)

さらに、DMSP/OLS 観測画像の特性に起因するものとして下記のものが考えられる。

- ・衛星の観測角度の変化^{注(1)}に伴う，都市光の直接光・反射光成分の変化
- ・衛星の観測角度の変化に伴う，都市光の大気通過距離の違い
- ・衛星鉛直直下から観測幅端部にかけての OLS センサ瞬間視野の違い^{注(2)}
- ・OLS センサの計測誤差
- ・観測データ平滑化時^{注(3)}のピクセル位置のずれ
- ・等緯度経度座標への投影変換時の高緯度におけるピクセルサイズの違い
- ・OLS ゲイン（利得）調整^{注(4)}の影響

DMSP は気象観測を目的としており，OLS のゲインは，センサの観測角度に関わらず一定した雲画像を生成するために制御されている．また，月光を反射する雲の姿を観測するため，月の高度によりゲインが変化する．そのため異なる観測日の画像の比較に際しては月の状況に注意を要する．

DMSP 衛星 F12 号機に搭載された OLS の打上げ前のセンサ較正值から得られた，夜間観測時の光電子倍增管 (PMT) モードにおけるゲイン設定値，放射輝度ならびに可視～近赤外バンド画像（以下，単に可視画像と呼ぶ）のデジタル値の関係を図 2-1 に示す．図 2-1 でグラフの縦軸はゲイン設定値を表し，単一の観測画像の局所領域では同一の値をとる．また，横軸は放射輝度を表し，観測画像では 6 ビットの整数 (0, 1, ..., 63) にデジタル化される．グラフ中の平行な 2 本の斜線は，各ゲイン設定値の観測で同一のデジタル値をとる放射輝度を表し，左側斜線はデジタル値 $D_V=1$ を，右側斜線はセンサで測定可能な範囲の上限である飽和値 $D_V=63$ を表す．図 2-1 から，ゲイン設定値 G (dB)，放射輝度 R ($\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$)，可視画像の各ピクセルが持つデジタル値 D_V は以下の式で相互に表される．

$$G = -20 \log_{10} R + 20 \log_{10} D_V - C_1 \text{ (dB)} \quad [1]$$

$$R = 10^{\frac{G+C_1}{20}} \cdot D_V \text{ (W/cm}^2\text{/sr/}\mu\text{m)} \quad [2]$$

$$D_V = 10^{\frac{G+C_1}{20}} \cdot R \quad [3]$$

$$\text{ここで, } C_1 = 141.83 \quad [4]$$

式[3]より，ゲイン G が同一の観測画像においては D_V は放射輝度に比例した量を表すことがわかる．

2.2.2 都市光観測画像を用いた被災地推定

以下，DMSP/OLS 都市光観測画像による被災地推定手法を述べる．ここで，以下の 2 つの仮定を導入する．

《仮定 1》

平常時，雲の影響が少ない場合，衛星により観測される都市光の放射輝度の変動は正規分布にしたがう．

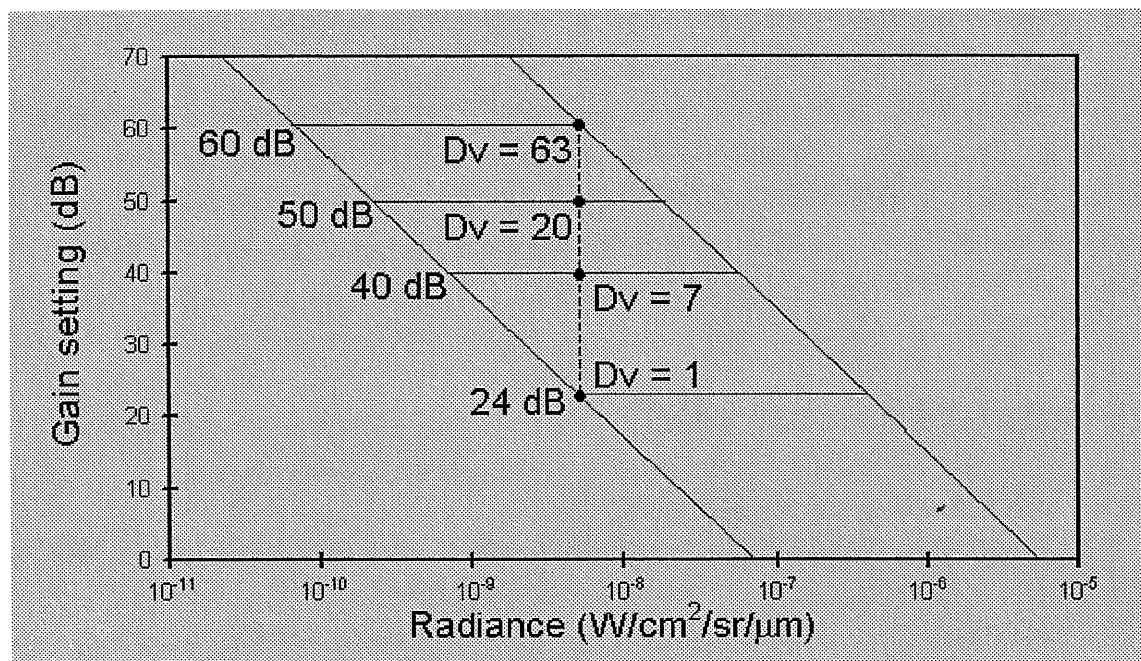


図 2-1 DMSP/OLS 観測画像におけるゲイン設定値、放射輝度ならびに可視画像デジタル値の関係

《仮定 2》

DMSP/OLS の可視画像の各ピクセルは、そのピクセルの領域内部に含まれる都市から発せられる人工光の放射輝度を変換した値を表す。

D_v の変動の正規分布が既知であるとき、ある観測画像において、有意な光量（放射輝度）の減少を示すピクセルが存在するならば、そのピクセル内の地域から発せられる都市光の放射輝度が、平常時の変動を超え異常な減少を生じているものと統計的に見なすことができる。すなわち、帰無仮説として

H_0 : 対象ピクセル位置の可視画像デジタル値の変動は平常時の変動の正規分布に含まれる。

をとり、事前に設定した有意水準で棄却されるとき、対象ピクセル内の都市光が異常減少していると考えられる。この画像が地震直後に観測されたものであれば、都市光の有意な減少は、地震による影響を受けた可能性が高く、そのピクセル内の地域は被災地であると推定することができる。以上より、地震後の都市光観測画像について、各ピクセルの D_v を参照し、正規分布検定を行うことで被災地を推定することができる。

2.3. 地震前後 2 画像による被災地推定

2.3.1. 地震前後 2 画像に基づく被災地推定手法

著者らの既往論文では地震前後 2 つの可視画像に基づく被災地推定手法（以下、地震前後 2 画像法）を提案した。以下、地震前後 2 画像法を説明する。

同一地域を観測した 2 つの可視画像におけるデジタル値の差 ΔD_v は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\Delta D_v &= D'_v - D_v \\ &= 10^{\frac{G'+C_1}{20}} \cdot R' - 10^{\frac{G+C_1}{20}} \cdot R\end{aligned}\quad [5]$$

ここで、2 つの観測画像で異なる量は $(\cdot)'$ で区別している。2 画像でゲインがともに G (dB) であれば、式[5]は以下のように変形される。

$$\Delta D_v = 10^{\frac{G+C_1}{20}} (R' - R) \quad [6]$$

したがって、仮定 1 にしたがったとき、 ΔD_v は正規分布にしたがい、さらに仮定 2 にしたがったとき ΔD_v はそのピクセルに含まれる都市光の放射輝度の変化を表す。

地震前後 2 画像法では、デジタル値の差 ΔD_v がどの都市のピクセルにおいても同一の正規分布にしたがうことを仮定している。これは以下の仮定を導入することと等価である。

《仮定 3》

DMSP/OLS で観測された都市光の放射輝度の変動は、OLS センサのゲインが同一の状況下であれば、同一の平均・標準偏差の正規分布にしたがう。

よって、地震前後 2 画像法は、仮定 1～3 のもと、まず 2 時期の観測画像で ΔD_v を求めて D_v の変動の正規分布を評価し、次に前章で述べられた手法により、地震後画像について正規分布検定を用いて被災地を推定するものである。地震前後 2 画像法の被災地推定手順は以下のようにまとめられる。

① 地震前後 2 時期の画像を選択

選択条件：

観測時の OLS のゲインが同等

都市光に対する月光の反射光の比率が同等

被災していないと考えられる都市が十分存在

都市状況が均一

② 都市域を対象に ΔD_v の平均、標準偏差を計算

③ 有意水準（または信頼率）を設定し、正規分布検定の閾値を計算

④ 各ピクセル位置の ΔD_v を参照し、正規分布検定により被災地を判定

2.3.2. 地震前後 2 画像法の問題点

本節では、地震前後 2 画像法の適用の際に注意すべき点、ならびに手法の問題点を述べる。

まず、仮定 3 は実際の観測データにより支持されたものではなく、特に都市の規模が異なるときには実状から乖離する可能性が高いといえる。例えば、非常に暗い、村程度の規模の都市光は、おのずからその都市光の変動幅が小さくなると考えられる。よって、仮定 3 の妥当性を保証するためには、少なくとも、都市状況がよく似た地域のピクセルを対象とする必要がある。

また、地震前後の 2 画像に光量が著しく減少した被災地が含まれる場合、サンプルデータから計算される ΔD_v の標準偏差は平常時の標準偏差に比べ大きくなる。したがって、同一の有意水準に基づく被災地判定の閾値はより負の側に小さくなる。つまり、著しく光量が減少する被災地の面積の割合が大きくなると、事前に設定した有意水準に基づきサンプルデータから求めた、被災地判定の閾値がより小さくなる。そのため、相対的に、より大きな減少を示したピクセルしか被災地として判定されなくなる。端的に言えば、地震前後 2 画像法により被災地を判定するためには、被災していない地域を十分含めて評価しなければ、被災地がわずかしか判定されなくなる。

判定の際に用いるべき、適正な画像の領域の大きさについては、被災していない地域を含める必要性から、地震規模マグニチュードに応じて広く選定する方法が考えられる。しかし一方で、広範囲に取りすぎた場合、OLS のゲインや観測角度等の違いが無視できなくなるため、適切な選定の方法は今後の研究課題である。

地震前後 2 画像法の問題点としては以下が挙げられる。

(a) 雲による散乱、反射、遮蔽の影響を受けやすい。

- (b) 地震前画像の水域の反射光により誤判定を生じることがある。
- (c) 対象地域内の都市のなかで、比較的小さな都市が被災地として判定されにくい。

まず (a)は、光学センサによる地上の観測全般にいえることであり、厚い雲は都市光を遮断してしまうなどさまざまな影響を及ぼすため、雲の影響が少ない画像を評価に用いる必要がある。そのため、適切な地震前画像の検索に時間を要する場合がある。なお、この問題を解決するため、著者らは地震前画像を人工的に作成し用いる手法を提案している。

次に(b)について解説すると、海洋、河川、湖沼などの水域は、月光や近傍の都市光をよく反射するため、衛星観測画像では、しばしば本来都市のない箇所で強い光が観測される。水面の波が様々な角度をなすため、衛星の観測角度が大きいときだけでなく、鉛直直下に近いときでも周辺の水域から反射光が届く。特にゲインの大きいときには、水域付近の都市が膨張して見える。また、河川・湖沼が多い地域では、本来都市のある箇所から離れた位置に強い光を観測することが起こる。水域で観測された都市光の反射光を直接光と誤って取り扱った場合、異なる日時の観測では同じ位置で同じ強さの光が観測されないため、あたかも町が消失してしまったかのように誤判定してしまうことになる。

また、(c)については、EDES の地理的な被災地分布情報の提供により、一部地域に偏った救援ではなく公平な災害対応活動を支援するという本来の目的に、反してしまう恐れがある。すなわち、広域の被災分布を推定しているにもかかわらず、小都市を無視するというバイアスがかかった情報を提供してしまう懸念があるといえる。

2.4. 時系列画像による被災地推定

2.4.1. 時系列画像に基づく被災地推定手法

前章で指摘した地震前後 2 画像法の問題点(b), (c)は、対象地域内で都市光の変動が一定であるという仮定を用いていることに起因しており、その解決のためには地域ごとにきめこまやかな都市光の変動を評価する必要がある。

地域ごとの都市光変動の評価方法としては、時系列分析が考えられる。そこで新月をはさむ約 10 日間（以下、ゲイン安定期間）は月光の影響が小さく、ゲインが比較的安定していることを利用し、過去 3 ヶ月程度のデータを集計し、ピクセル位置ごとに平均と標準偏差を求め、ピクセル位置ごとに正規分布検定を行う方法（以下、時系列画像法）を新たに提案する。時系列画像法の被災地推定手順は以下のとおりである。

① 過去数十日間の地震前画像（時系列画像）を選択

選択条件：

新月をはさむ約 10 日間のゲインが比較的安定した期間（ゲイン安定期間）の画像

- ② 時系列画像より、各ピクセル位置ごとに平常時の D_V の平均、標準偏差を計算
- ③ 有意水準（または信頼率）を設定し、各ピクセル位置ごとに正規分布検定の閾値を計算
- ④ 地震後画像について、各ピクセル位置ごとに D_V を参照し、正規分布検定により被災地を判定

本手法を用いれば、(b)、(c)の問題を解決するだけでなく、複数の画像のいずれもが雲に覆われている確率が非常に小さいことから、(a)のうち、地震前画像の雲の問題についても、解決することが可能となる。なお、多くの画像を用いる必要があるため、観測画像の投影変換処理に若干時間がかかることが問題点として挙げられる。

2.4.2. 2001年インド西部地震への適用

現地時間 2001 年 1 月 26 日 8 時 46 分にインド西部、パキスタン国境付近のグジャラート州で発生したインド西部地震は、マグニチュード $M_w7.7$ (USGS) と非常に地震規模が大きく、死者が 2 万人にも達するという、グジャラート州での壊滅的な被害が報告されている。隣国のパキスタンでも、Thatta, Hyderabad 等の都市で少なくとも 32 人の死者発生が報じられた。

まず、地震前後 2 画像法による被災地推定を行った。地震前の画像として 2001 年 1 月 25 日の観測画像を参照したが、いずれも震源近傍を 1 つの観測画像でカバーできないため、その前日の 2001 年 1 月 24 日 F15 号機観測画像を選択した。可視画像を図 2-2 に示す。左下の灰色の三角形領域は観測域外を表す。地震後の 2001 年 1 月 26 日 F15 号機観測画像の可視画像を図 2-3 に示す。観測時の月齢は地震前画像：0.1 日、地震後画像：2.2 日といずれも新月直後のため月光の影響はなく、地震前後 2 画像の観測時のゲインはほぼ同一と考えられる。2 画像に基づく被災地推定結果を図 2-4 に示す。ここで、熱赤外バンド画像による雲の除外のための閾値は 0°C を用いた。図 2-4 にはエッジデータのため信頼性が低いと思われる箇所を図左上に、被害がほとんどなく、水域のため誤判定を生じたと思われる箇所を図上部に、雲・水域の影響のため信頼性が低いと思われる箇所を図右下に示している。

次に、時系列画像法による被災地推定を行った。2000 年 10 月から 2001 年 1 月（地震前まで）のゲイン安定期間のデータ（計 32 日）を用い作成した、可視画像デジタル値の平均画像と標準偏差画像をそれぞれ図 2-5, 6 に示す。これらを用い、ピクセルごとに正規分布検定を行い、被災地を推定した結果を図 2-7 に示す。ここで、雲の判定閾値は先ほどと同じ 0°C を用いている。また、非都市域を除外するため、平均画像でデジタル値が 5 以下の地域をノイズによるものと見なし、被災地推定の対象から除外している。

2 つの被災地推定結果を比較すると、図 2-4 で誤判定を生じたと思われる水域の推定被災地の大半が、図 2-7 の時系列画像法による被災地推定結果ではなくなっており、加えて、比較的小さな都市も推定被災地として現れていることがわかる。これらの被災地は被害調査報告とのよい整合が確認されている。

2.4.3. 1995年兵庫県南部地震への適用

インド西部地震の発生時は新月直後であり、地震後画像は、平均・標準偏差の評価に用いた時系列画像と同じくゲイン安定期間の画像であった。一方、1995 年兵庫県南部地震発生時には月齢は 16.1 日と満月に近く、ゲインが新月時よりも小さくなっており、地震前のゲイン安定期間の時系列画像とは単純な可視画像デジタル値の比較ができない。したがって、ゲイン安定期間以外の地震後画像についても被災地推定が行えるよう、手法の応用を考慮する必要がある。

ゲイン安定期間の通常の観測では、ゲインが大きく感度が高すぎるため、多くの大都市でデータが飽和値に達してしまう。Elvidge らは、F12 号機の OLS のゲインを固定するリク

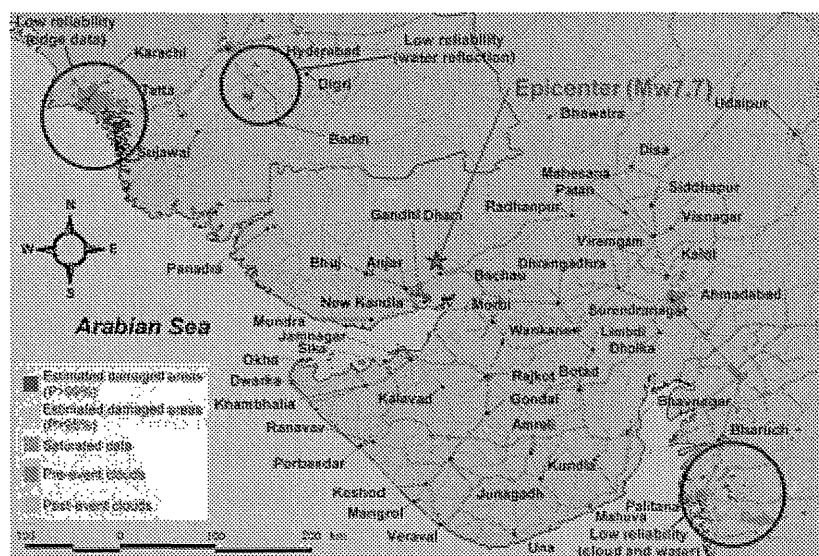
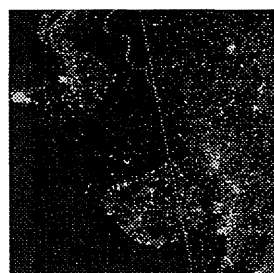
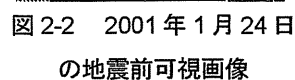


図 2-4 地震前後 2 画像法によるインド西部地震の推定被災地
(信頼率 99%と 95%で表示)



図 2-5 可視画像デジタル値
の平均画像

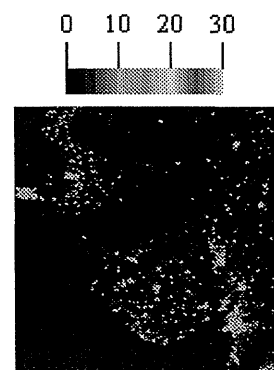


図 2-6 可視画像デジタル値
の標準偏差画像

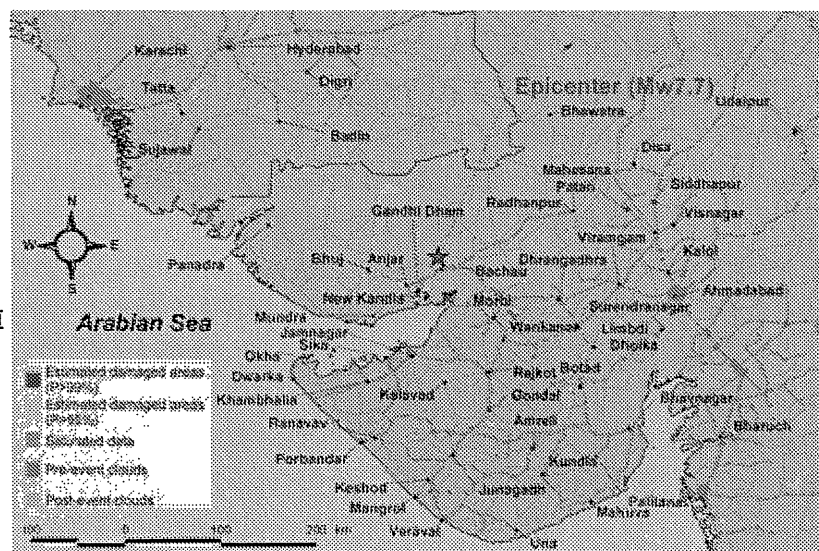


図 2-7 時系列画像法によるインド西部地震の推定被災地
(信頼率 99%と 95%で表示)

エストを米国空軍に対して行い、1996年3月から1997年2月までの新月をはさむ10日前後について、3段階のゲインを用い、微弱な光から大都市の強い光の放射輝度の観測を行い、放射輝度較正画像（以下、RCI）を作成した。RCIでは大都市でも放射輝度の値が明らかとなっている。

KohiyamaらはRCIを活用し、ゲイン安定期間以外の観測ゲインを推定する手法を提案している。ゲイン安定期間以外では、都市光だけでなく月光の反射成分も含まれるが、この手法ではこれをわずかなものと仮定し、可視画像の飽和領域に含まれるRCIのピクセルを参照し、最も多く含まれる放射輝度の値を飽和開始点（ $D_v=63$ ）として、式[1]からゲインを求めている。Kohiyamaらの手法を用いることで、可視画像デジタル値を放射輝度に換算することができるため、異なるゲインの観測画像も比較することが可能になる。

図2-8に西日本のRCIを示す。また、1994年12月17日（月齢14.5日）にF12号機により観測された地震前画像、1995年1月17日（月齢16.1日）にF10号機により観測された地震後画像をそれぞれ図2-9、10に示す。1994年10月から1995年1月（地震前まで）のゲイン安定期間のデータ（計24日）を用い作成した、可視画像デジタル値の平均画像と標準偏差画像をそれぞれ図2-11、12に示す。

ゲイン安定期間ではゲインはおおよそ55 dBの値となっている。そこで図2-8のRCIと図2-11の可視画像デジタル値の平均画像を比較するため、RCIの放射輝度を式[3]により55 dBの可視画像のデジタル値に変換し、陸地のピクセルのみについて、同一位置の平均画像のピクセルと比較した。度数を円の大きさで表した散布図を図2-13に示す。これより、デジタル値で40程度までは直線的な対応関係があるが、それを上回るとデータの飽和が生じ、RCIの変換値よりも観測値のほうが小さくなることがわかる。これは、DMSP/OLSの平滑化モード画像^{注(3)}が高分解モード画像の5×5ピクセルのデジタル値の平均となっていることに起因する。すなわち、デジタル値が40を超える地域では5×5ピクセルのいずれかのピクセルが既に飽和値に達している場合があるため、その際には実際の放射輝度よりも小さな値となっていると考えられる。

各ピクセルの平均と標準偏差について、度数を円の大きさで表した散布図を図2-14に示す。これより、デジタル値40程度までは平均値と標準偏差に比例的な関係が認められる。しかし、平均値が40を超えると次第に標準偏差

が小さくなり、飽和値63付近では標準偏差が0に近い値となっていることがわかる。これは、可視画像デジタル値が飽和値に達することで変動に上限が与えられているためと考えられる。したがって、平均値が40以上についてはこの飽和の問題により、都市光の変動が正しく評価されていないといえる。一方、平均値40まではほぼ比例的な関係があるため、ここで、以下の仮定を導入する。

《仮定4》

都市光の放射輝度の変動は、その平均値に比例する標準偏差をもつ正規分布にしたがう。

兵庫県南部地震の被災地推定では図2-14より比例定数として0.3を用いた。また、図2-11の平均画像は大都市の放射輝度を反映していないため、地震後の画像となるが、RCIの変換値を平常時の平均値として用いた。正規分布検定で用いる標準偏差としては、水域を

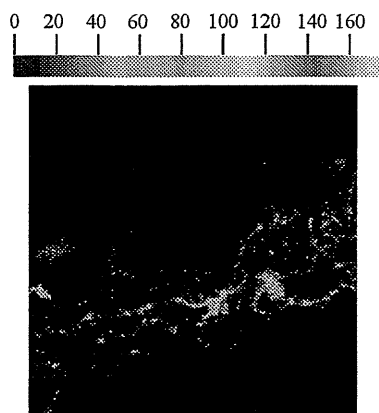


図 2-8 放射輝度較正画像 (RCI)

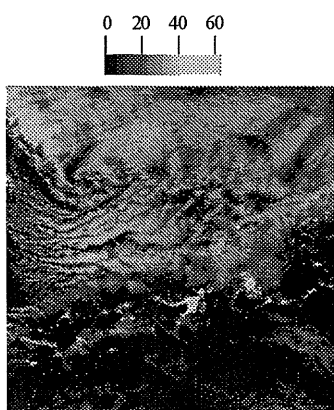


図 2-9 1994 年 12 月 17 日
地震前可視画像

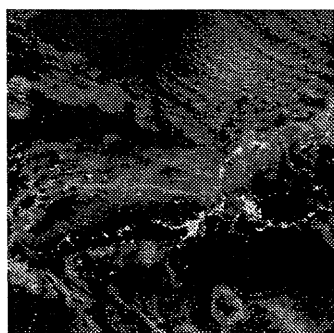


図 2-10 1995 年 1 月 17 日
地震後可視画像

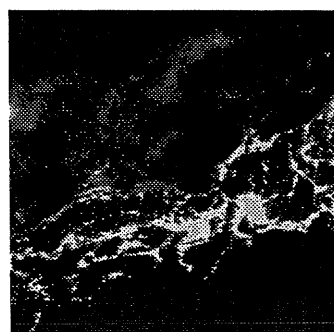


図 2-11 可視画像デジタル値の
平均画像

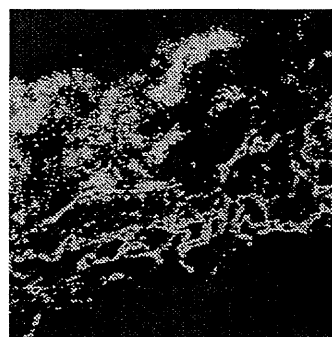


図 2-12 可視画像デジタル値
の標準偏差画像

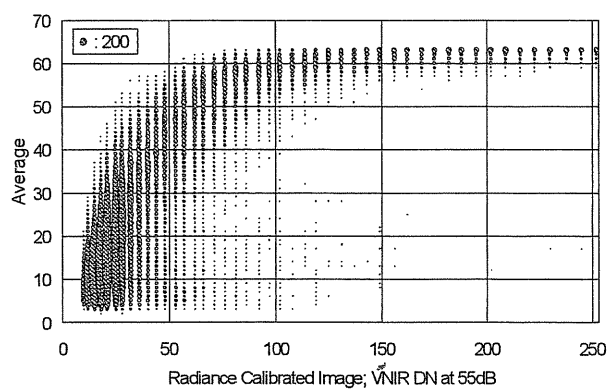


図 2-13 放射輝度較正画像をゲイン 55dB の可視画像
デジタル値に変換した値と可視画像デジタル値の
平均画像の関係

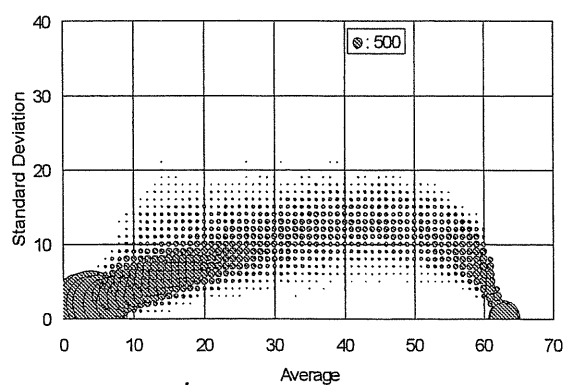


図 2-14 可視画像デジタル値の平均画像と可視画像
デジタル値の標準偏差画像の関係

考慮するため、時系列画像から評価される標準偏差の値と RCI から求められる平均値 $\times 0.3$ のいずれか大きいほうを採用し、被災地の推定を行った。地震前後 2 画像法による推定被災地、時系列画像法による推定被災地をそれぞれ図 2-15, 16 に示す。ここで、熱赤外バンド画像による雲判定閾値としては、 0°C では海沿いを除くほとんどの地域が雲とみなされてしまうため、 -3°C を用いた。雲の周辺で被災地と判定されている箇所が多く見受けられるが、これは -3°C では雲を完全に除去できていないためと考えられる。地震発生が冬季の場合は、雲の除去のための適切な閾値を設定するのに注意が必要である。図 2-15, 16 を比較すると、地震前後 2 画像法で見られる高槻市、大阪狭山市、堺市、岸和田市といった建物被害、停電がなく、誤判定とおもわれる地域が、時系列画像法では被災地として判定されておらず、この点では精度の向上がみられる。しかし、大きな被害があった神戸市については、時系列画像法では被災地と判定された面積がかなり小さくなっていることがわかる。この点については、平均画像として用いた RCI は被災後およそ 1 年から 2 年後の間に作成されたものであり、被災前よりも暗い可能性が指摘できる。また、地震後画像には都市光に加え月光の反射光も含まれていることも原因として考えられる。

なお、両者で同一の有意水準を用いた場合に、被災地に相違があることは明らかであり、今後、他の地震についても被災地の推定精度について検証を行う必要があるといえる。

NOAA/NGDC は米国空軍に対し、F12 号機のゲイン固定のリクエストを現在も出しており、観測ゲインの情報が公開されている。今後、最近の観測画像を用い、大都市についても正確に平均・標準偏差の評価を行うことで、ゲイン安定期間以外にも時系列画像法を適用できるようにしたいと考えている。

2.5. まとめ

本論での成果は以下のとおりである。

- ・DMSP/OLS 夜間観測画像のデジタル値、センサのゲインならびに放射輝度の関係式から、被災地推定手法の定式化を行った。

- ・地震前後の 2 画像を用いた既往手法（地震前後 2 画像法）の問題点として、(a)雲の影響を受けやすい、(b)周辺の都市光の水域の反射により誤判定を生ずることがある、(c)比較的暗い都市の被害を検出しにくい、の 3 つが挙げられ、(b)・(c)は対象地域の都市光が全て同一の標準偏差の正規分布にしたがうという仮定によることを明らかにした。

- ・上記問題を解決するため、月光の影響が小さく、ゲインが比較的安定する新月をはさむ約 10 日間に観測された画像の時系列データにより、都市光放射輝度のピクセル単位の平均、標準偏差を求め、ピクセル単位の正規分布検定を行う新たな被災地推定手法である時系列画像法を提案した。

- ・インド西部地震の被災地推定を行い、時系列画像法では水域の誤判定が減少し、比較的小さな都市も被災地として判定されることを確認した。

- ・大都市の都市光では観測値が飽和するため、都市光放射輝度の平均、標準偏差に誤差が生じることを示した。この問題を解決するため、標準偏差が平均におおむね比例することを利用し、大都市の放射輝度が計測されている放射輝度較正面像から標準偏差を推定する方法を提案した。

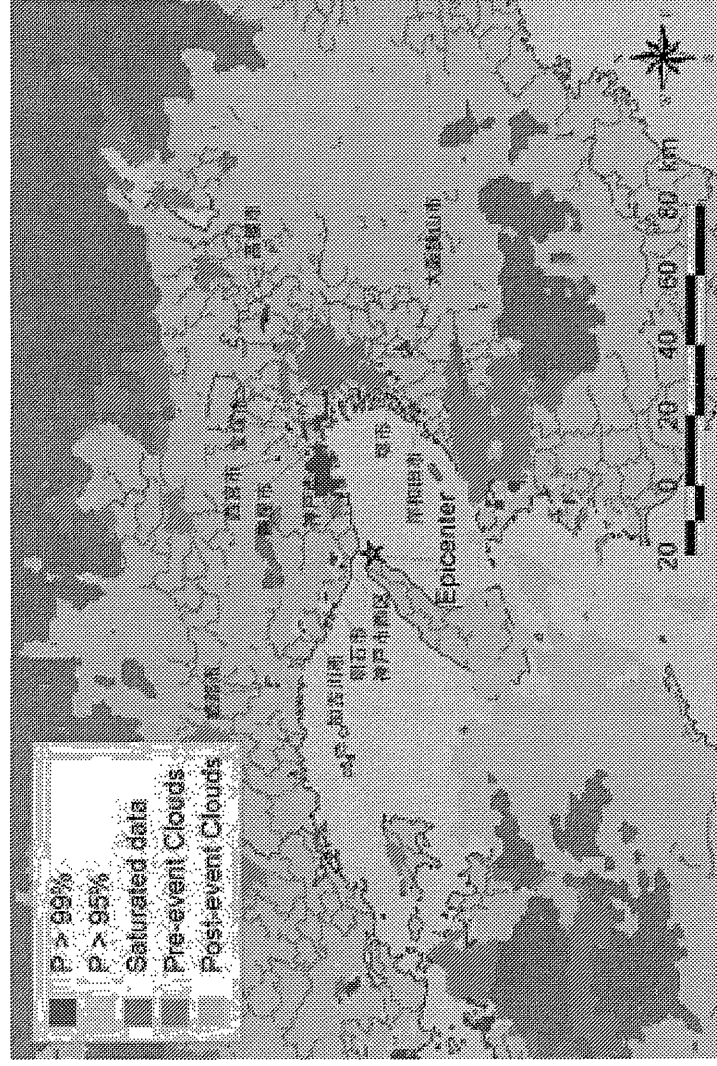


図2-15 地震前後2画像法による兵庫県南部地震の推定被災地
(信頼率 99%と 95%で表示)

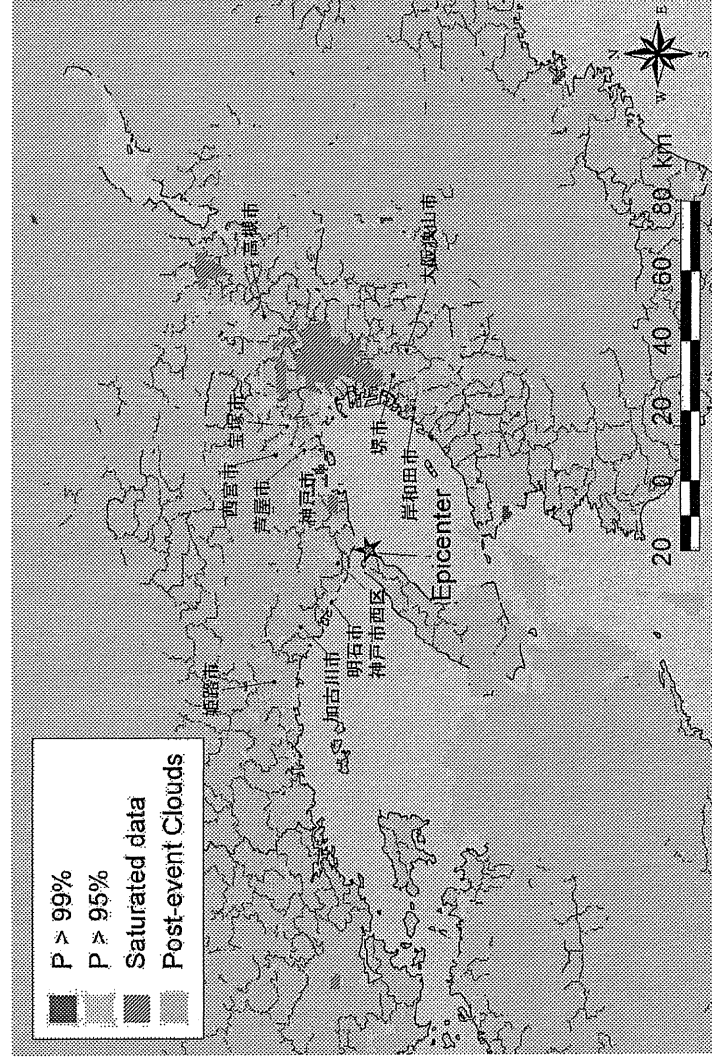


図 2-16 時系列画像法による兵庫県南部地震の推定被災地
(信頼率 99%と 95%で表示)

・前記の標準偏差推定方法を援用し、兵庫県南部地震について、被災地推定を行った。その結果、地震前後2画像法で誤判定された一部の推定被災地が、時系列画像法では被災地と判定されないことを確認した。

今後の課題としては、ゲイン安定期間以外でも時系列画像法による被災地推定を行うため、最新の放射輝度較正画像により、平均、標準偏差を評価することが上げられる。また、雲の除去のための適切な温度閾値の設定方法についても検討の必要がある。

本論の執筆時点では EDES は被災地推定、被災地分布地図作成など、個別処理を行うプログラム群に分かれており、地震発生後 24 時間以内に情報提供を行うべく、プログラムの統合ならびに自動運用に向けシステム構築を進めている。2001 年 10 月には、まず処理時間が短く、アルゴリズムが単純な地震前後2画像法での自動運用テストを開始する予定であり、その後、本論で提案した時系列画像法の追加等、順次拡張を行っていく計画である。

また、災害対応活動の支援のためには、被災地の地理的な分布だけでなく、人口や都市規模など、救援を差し向ける際の意思決定の基礎となる、都市状況などの情報提供も必要である。今後、災害対応の意思決定支援が可能となるような情報提供のあり方を研究し、EDES を発展させていきたい。

DMSP 衛星は F16 号機から F20 号機までの打上げが決定しており、2010 年から 2015 年程度までの運用が期待できる。また、米国では 2008 年に DMSP と NOAA 衛星が統合された NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) 衛星の打ち上げが計画されている。この NPOESS 衛星には、VIIRS (Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite) という NOAA 衛星の AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) センサなみのマルチバンド、OLS センサなみの夜間観測における可視バンドの感度、大都市でも飽和しない広いダイナミックレンジ、OLS センサ高分解モード画像なみの空間分解能といった、高い能力のセンサが搭載される予定である。本論で展開した被災地推定手法は、今後打ち上げ予定のこれらの衛星観測画像でも容易に適用可能であり、DMSP 衛星の運用終了後も本論の手法を災害対応の支援に役立てることができると考えられる。

3. 広域地震被害想定における被害ポテンシャル把握の現状 と DMSP/OLS 夜間可視画像の利用可能性の検討

本章では、広域地震被害想定に必要な、地震に起因する外力の推定手法と被害ポテンシャル把握手法の現状を整理し、被害ポテンシャル把握手法に求められる要件を明らかにする。さらに、その要件を満たす手法の開発における DMSP/OLS 夜間可視画像の利用可能性を検討する。

3.1. 広域地震被害想定プロセスの概要

1.でも述べた通り、自然災害による被害は、ある脆弱性をもつ社会システムに地震などの自然外力が及ぶことにより発生すると捉えられる。発生する被害の程度は、災害に対する社会システムの強さと、自然外力の強さの関係から定まると考えられる。よって、地震被害想定プロセスは、大きく次の3つから構成されると捉えることができる。

1)地震に起因する自然外力の空間分布の推定

2)被害ポテンシャルの空間分布の推定

3)被害の推定

図 3-1は、損害保険料率算定会（1998）、佐伯・坪川・汐見（1999）が示す「一般的な地震被害想定調査の流れ」の図に筆者が加筆したものである。原図には、地震に起因する自然外力の空間分布の予測、自然外力予測に必要なデータの整備、そして各種被害の予測に関しては述べられているものの、被害ポテンシャルの空間分布の推定に関しては、触れられていない。そこで、各種被害の推定に必要な被害ポテンシャルデータの整備を原図に書き加えている。被害想定を行うにあたり、はじめに行われることは、想定する地震を設定することである。想定地震と想定対象地域の地質構造・表層地盤種を考慮して、地震動、液状化、斜面崩壊が予測される。また、想定地震と海底地形、海岸線の形状、沿岸域の土地利用状況等をもとに、津波の海岸線上の波高、浸水域、浸水深分布が予測される。得られた各種自然外力と、各種人工物の被害ポテンシャル分布から、強震動による建物被害、交通施設被害、土木構造物被害、ライフライン被害が推定される。強震動による建物被害と消防設備の分布状況、風向・風速にもとづき出火件数、焼失棟数・面積が予測される。予測された建物被害、交通施設被害、ライフライン被害と、人的被害ポテンシャル分布から、死傷者数、要救出者数、避難者数あるいは生活困難者数、ライフライン供給停止状況が予測される。多くの研究者が、地震被害想定での利用を指向した各種被害の推定手法を提案している。多くの被害推定手法は、過去の災害における自然外力と被害、あるいは被害と被害の関係に基づいた経験的なものである。また、1.で指摘したとおり、基本的に想定される被害は、ストック被害であり、フロー被害の推定は、ほとんど行われていない。

自然外力も、被害ポテンシャルも、発生する被害も、その空間分布は一様ではなく、偏りがある。しかし、個々の人工物にどのような地震外力がかかり、個々の人工物がどの程度の強度を持っているのか、また一人一人の人間がどこに存在して、どのような活動をしているのかといった詳細なデータを得ることは不可能である。そこで、一般に、想定対象領域を複数の分析単位に分割して、その分析単位ごとに、自然外力の強さ、存在する被害ポテンシャルの量が推定

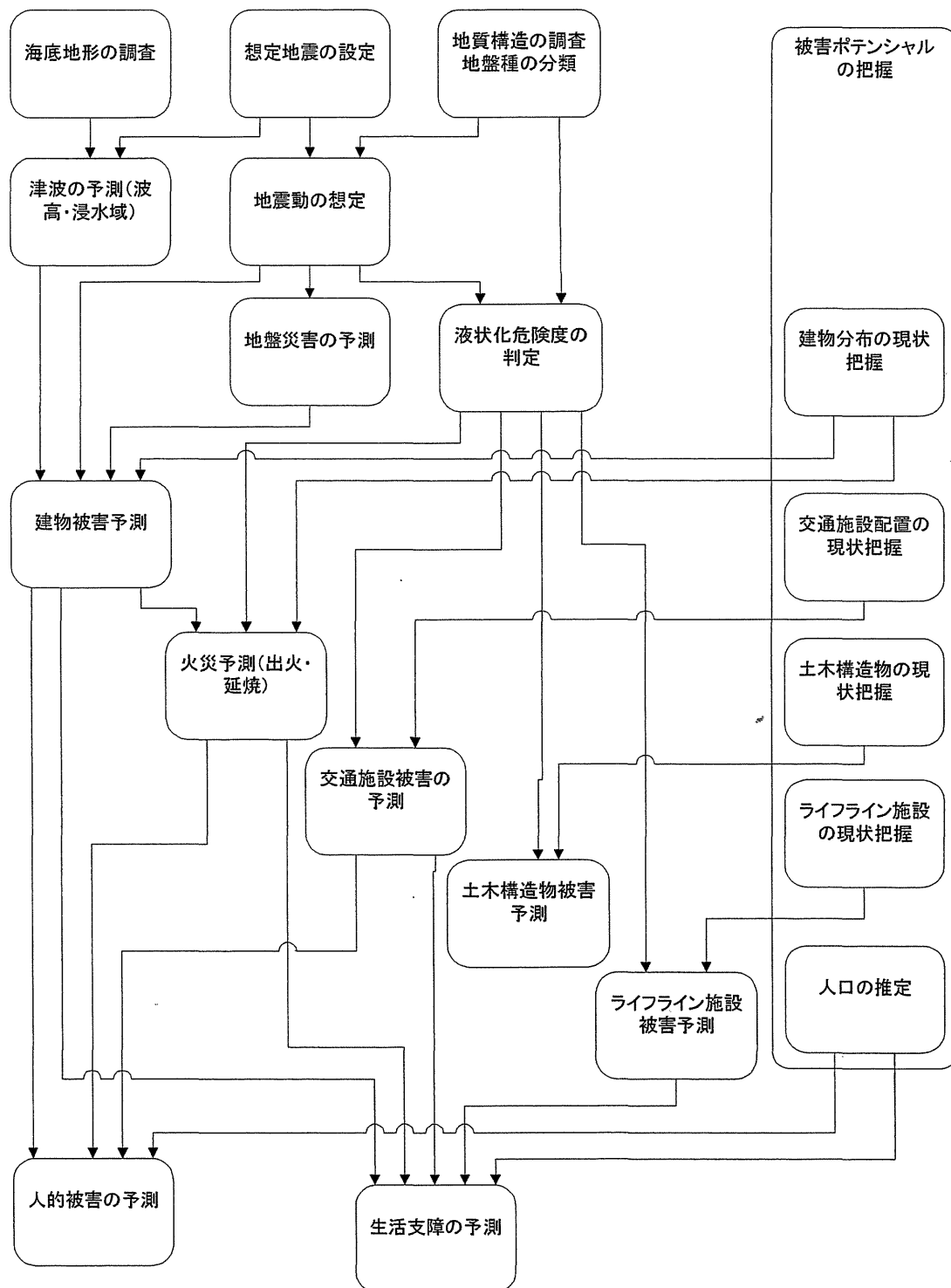


図2-1 一般的な地震被害想定調査の流れ(損害保険料率算定会(1998)に対し、筆者が加筆したもの。各種被害の推定に必要な被害ポテンシャルデータの整備を原図に書き加えられている。)

され、両者を入力として被害の量が推定される。この分析単位が大きさが小さいほど、すなわち空間解像度が高ければ高いほど、より詳細な被害の空間分布を把握することが可能になる。

従来、地震被害想定では、各都道府県あるいは政令指定都市が自らの管轄区域内に被害をもたらすであろう、いくつかの地震を想定し、その地震によってもたらされる被害のうち、管轄区域内で発生するもののみを推定することが多い。これは、ある地震がもたらす被害の全貌が把握されていないことを意味する。複数の自治体が、同じ想定地震に関して被害想定を行っている場合もある。しかし、能島(1999)、佐伯・坪川・汐見(1999)が指摘するように、これらの地震被害想定では、同じ地震を想定しているものの、断層モデルの設定、地震動の推定手法、被害推定手法、分析単位が、自治体ごとに異なっている。よって、これらの被害想定を単にまとめただけでは、地震災害の全体像を把握したとは言い難い。被災地が複数の自治体に及ぶような広域地震災害の発生を想定した場合、個々の自治体の対応・対策のあり方は、単に自らの管轄区域内で発生する被害だけでなく、同じ地震が近隣の自治体にもたらす被害の状況によっても変わるはずである。国あるいは複数の自治体が協力して、広域的な支援計画・防災計画を作成し、広域地震災害に対応するためにも、行政界を越えて発生する被害の全体像の把握が必要不可欠である。

以上のような経緯から、行政界にとらわれず広域の地震被害を想定可能な手法の研究が行われるようになった。松岡・翠川の一連の研究(松岡・翠川(1993a,b)、松岡・他(1993)、松岡・翠川(1995))は、その先駆けである。松岡・翠川のコンセプトは、被害想定に必要なデータを、全国的に整備された国土数値情報や国勢調査あるいは事業所統計調査の1kmメッシュ(第3次標準地域メッシュ、JISX0410)データから得ようとする点である。これにより、全国の任意の場所で発生する地震に対して1kmメッシュを分析単位とした被害想定が可能となっている。広域地震被害想定を目指したシステムの代表例である、内閣府防災局の地震被害想定支援ツール Version 0.10(以下 Quake Ver. 0.10)および消防庁消防研究所の簡易型地震被害想定システム Ver.2(以下消研システム Ver.2; 消防庁消防研究所(1996,1997))でも松岡・翠川のコンセプトは採用されている。これらのシステムは、両者とも Microsoft Windows 系の OS 上で動く計算プログラムと、人的被害および建物被害の推定に必要なデータから成り、広く一般に提供されている。Quake Ver. 0.10 は、内閣府防災局のホームページから誰もが無償でダウンロードすることが可能である。また、Quake Ver. 0.10 は、同じく内閣府防災局が提案する地震被害想定支援マニュアルの一部をアプリケーション化したものであるが、マニュアルの内容も公開されているため、独自に必要なデータを収集できれば、火災被害、交通被害、上水道被害の推定も可能となっている。消研システム Ver. 2 も、CD-ROM 版を 10,000 円で販売している。これにより、誰もが、任意の地震がもたらす被害の概要を 1km メッシュ単位で把握することが可能になっている。

その後様々な研究者が、被害想定に必要なデータを国勢調査や国土数値情報を元に 1km メッシュ単位で推定する手法を提案している。行政界にとらわれず、任意の地震による被害の全体像を 1km メッシュ単位で想定するという、これらの広域地震被害想定の考え方は、本論文でターゲットとする南海・東南海・東海地震の被害想定を行う上でも、非常に有用である。しかし、現状では、想定に必要なデータ、特に時間と共に変化する被害ポテンシャルの 1km メッシュ空間分布を、5 年に 1 度実施され、公表まで 2 年のタイムラグがある国勢調査や、社会経済統計調査に依存せざるを得ないという問題がある。以下では、広域地震被害想定を指向した、自然外力、および被害ポテンシャルの空間分布の推定手法の現状について、Quake Ver. 0.10 および消研システム Ver.2 において採用されている手法を中心に述べる。

3.2 地震に起因する自然外力の空間分布の推定

地震に起因する自然外力の空間分布を推定する際に、最初に行われることは、想定する地震の位置、深さ、マグニチュード、断層面の形状といった断層パラメータを設定することである。様々な研究者が、大きな被害をもたらした記録のある地震や、有史以前に発生した痕跡があり将来大きな被害をもたらす地震の断層パラメータを同定している。同じ地震に対して複数の研究者が、異なる断層パラメータを提案していることもある。大きな被害の記録がある地震の断層パラメータに関しては、佐藤(1989)が、1498年から1987年に発生した地震の断層パラメータの同定に関する調査・研究を整理している。兵庫県南部地震以降の各都道府県・政令指定都市における被害想定では、将来その地域で起こりうる地震のうち、その発生によって甚大な被害を被ると各自治体が認識している1つあるいは複数の地震が選択されている。その一方で、地震調査研究推進本部(2002)が作成している確率論的地震動予測地図のように、ある一定期間内に発生が予測される全ての地震に関して、その発生確率と、対象地域にもたらされる外力の大きさを考慮し、対象地域が一定期間内に強い地震動に見舞われる可能性を予測するという考え方もある。

想定する地震の断層パラメータが設定されると、その地震がもたらす自然外力の空間分布が推定される。地震発生に伴って、人工物環境がさらされる自然外力は必ずしも地震動だけではない。地域によっては、津波、液状化、地盤崩壊が発生し、人工物環境を襲う。これらの自然外力のうち、地震そのものに直接起因して発生する自然外力は、地震動と津波である。液状化と地盤崩壊は、地震動がもたらす二次的な自然外力として推定される。

強震動の評価に関しては、様々な研究者が、様々な手法を提案している。地震予知総合研究振興会・地震調査研究センター(1998, 1999)では、1980年代後半以降の地震学・地震工学における、強震動評価の考え方、各研究者の提案する評価手法の特有の傾向、適用限界、その手法を用いる際に必要となるパラメーターを網羅的に整理している。地震調査研究センター(1998, 1999)によれば、近年の地震動評価においては、ある地震による地表面の地震動は、1)断層においてどのような地震波が放出されるか(震源特性)、2)放出された地震波がどのように地表付近にまで伝搬するか(伝搬特性)、3)地表付近の地盤によって地震波がどのように増幅されるか(サイト特性)、の3つの特性の合成として表される。これを模式的に表したものが、図3-2である。サイト特性が、伝搬特性とあえて別に考慮されるのは、地表面付近の地層構成、地盤条件が、地表面において観測される地震動に大きな影響を与えていることが知られており、近接した地点においても、地盤条件が異なると、地震動の特性が大きく異なることがあるからである。

前述したように、強震動評価の手法は様々なものが提案されているが、手法によって、必要とする情報は大きく異なる。地震調査研究センター(1998)によれば、経験的方法以外の手法では、伝搬特性、サイト特性をモデル化するための評価地域に関する十分な地下構造の情報、あるいは伝搬特性、サイト特性を反映するための十分な観測記録を必要とする。しかし、そのような地下構造の情報や、観測記録が整っている地域は日本国内でもまだまだ限られている。そのような背景から、広域地震被害想定を行う場合には、経験的に地表面最大加速度、地表面最大速度といった地震動の強さの最大値を予測する手法、いわゆる距離減衰式の適用可能性が非常に高いといえる。

内閣府防災局の地震被害想定ツール Quake Ver.0.10、あるいは消研システム Ver.2 においても、地震動推定には距離減衰式が採用されている。距離減衰式は、一般に評価地点における地震動の強さを、地震のマグニチュード、震源域からの距離、評価地点のサイト特性から、式2-1の

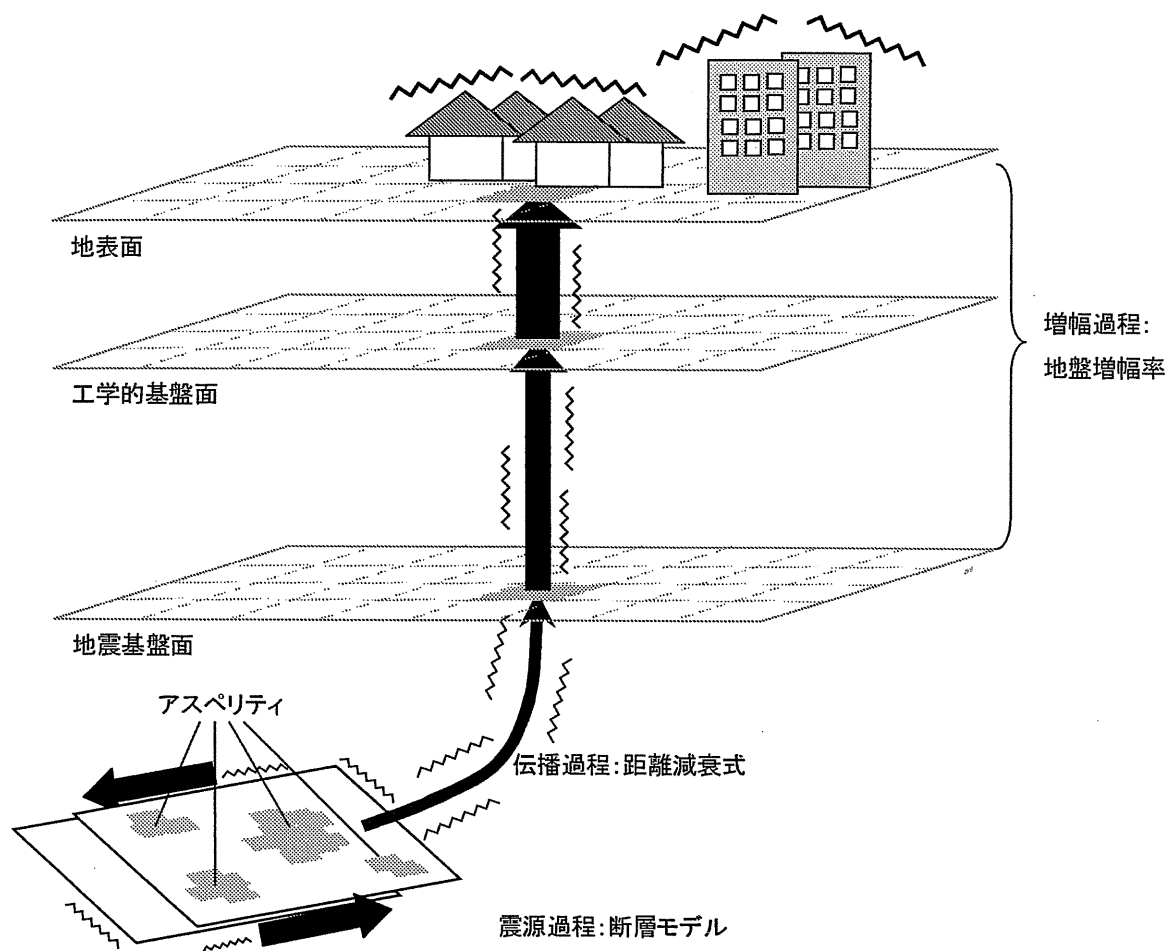


図2-2 地震動評価における震源過程・伝播過程・増幅過程

ように表現する。

$$\log A = aM - b \log X + c \quad [2-1]$$

A :地震動の強さ (地表面最大加速度, 地表面最大速度, 計測震度等)

M :マグニチュード, X :震源距離あるいはそれに替わる震源域との距離

a, b, c :回帰係数 (c はサイト特性に対応)

地震動の強さとしては, 最大加速度, 最大速度, SI 値, 計測震度が採用される。震源距離には, 断層までの最短距離, 等価震源距離, 震源深さと地表面への断層面の投影までの最短距離の和など, 提案される式により様々である。距離減衰式は震源特性をマグニチュードと震源距離, 伝搬特性を震源距離, サイト特性を c で考慮していると考えることができる。距離減衰式は多くの研究者によって提案されている。Quake Ver 0.10 では, Midorikawa (1993), 司・翠川 (1999), 安中・山崎・片平 (1997) が提案する 5 つの距離減衰式を選択可能なシステムとなっている。消研システム Ver.2 では, Midorikawa (1993) の手法を採用している。

距離減衰式から推定される地震動の強さが, 基盤面上の値である場合, その値に地盤条件を考慮した増幅率を掛け合わせることでサイト特性が考慮される。最近の研究では, 松岡・翠川 (1995), 福和・荒川・西阪 (1998), 小檜山・他 (1999), 大西・山崎・若松 (1997) が, 過去の地震観測記録から, 第 3 次標準地域メッシュ (1km メッシュ) 単位で明らかになっている国土数値情報における地形・地質分類と, 地震動の強さの増幅率の関係を導き出した。日本全国の任意の地点の地盤増幅率を 1km メッシュ単位で推定可能であるという点で, 広域地震被害想定に適しているといえる。Quake Ver. 0.10 でも消研システム Ver.2 でも松岡・翠川 (1995) を採用している。距離減衰式と, 国土数値情報を用いた地盤増幅率の推定手法の組み合わせは, 広域の地震動の空間分布を簡便に求めるうえで, 非常に有効であるといえる。

地表面における地震動の強さが推定されると, それに基づいて, 液状化および地盤崩壊の危険性が評価される。松岡・翠川 (1993) は, 従来の液状化発生の予測に利用されてきた, 限界 N 値法や, F_L 法や P_L 法が, 多数の地盤調査資料の収集・解析を要求することから, 若松 (1992), Kotoda・Wakamatsu・Midorikawa (1988) の成果を元に, 国土数値情報における地形分類と地表面最大速度から, 液状化の発生を予測する手法を提案している。Quake Ver.0.10 の内部では, 液状化の危険性の評価は行われないが, 地震被害想定支援マニュアルの中で, 松岡・翠川 (1993) に基づく評価手法を解説している。消研システム Ver.2.0 では液状化の評価は行われていない。また, 松岡・翠川 (1995) では, 広域にわたり収集可能な簡単な地盤・地形情報のみを用いて斜面崩壊予測を行っている神奈川県地震被害想定報告書 (1986) を元に, 国土数値情報から得られる各メッシュ毎の平均勾配, 地形分類, 堆積物と地表面最大速度から, 斜面崩壊を予測する手法を提案している。Quake Ver.0.10 及び消研システム Ver.2.0 では, 斜面崩壊の評価は行われていない。

近年の津波の評価手法に関しては, 財団法人日本気象協会 (1997) に詳しい。津波の評価において最終的に得られるのは, 津波の浸水域内における水深の分布である。津波災害予測マニュアルによれば, 津波浸水予測は便宜的に 1) 地震に起因する地殻変動に伴う津波の発生, 2) 外洋から沿岸への伝播, 3) 陸上への浸水, 遡上, の 3 つの過程に分けることができる。1) では, 多くの場合, 断層パラメータを元に, Maninsha・Smylie (1971) の手法に基づいて海底の鉛直変位の分布が計算される。2) では, 海水が浅水理論に従って運動するものとし, 流体の連続

の式と運動方程式からなる連立方程式を、差分法等により数値計算し、津波発生領域周辺から沿岸域に至るまでの領域における水位と流速の分布が求められる。数値計算にあたっては、海底の鉛直変位を初期値として与える必要がある。また、津波発生領域周辺から沿岸域に至る領域における計算格子単位での水深の分布と、計算格子単位での海岸線の形状が必要となる。3) においても 2) と同様、遡上域における浸水深と流速を数値計算によって求められる。ただし、この時には、水位の昇降に伴う汀線の前進・後退や、人工物によるエネルギー損失を計算に取り入れる必要がある。そのため、遡上域における標高、土地利用状況や、人工物の分布状況がデータとして必要となる。Quake Ver.0.10 においても、消研システム Ver.2 においても津波とそれに起因する被害の評価は行われていない。

国土数値情報における地形・地質情報は、各 1km メッシュ内の代表的な地形・地質情報が格納されているだけであり、実際には同じ 1km メッシュ内においても微地形や複雑に入り組んだ地形・地質の影響で、地震動の強さ、液状化・斜面崩壊の危険性は大きく異なる。このことから、上記の手法による自然外力の推定は、あくまで、各 1km メッシュにおける代表的な値を推定していることに注意する必要がある。

3.3. 被害ポテンシャル分布の推定

被害推定を行うためには、そもそも個々の分析単位内にどれだけの量の被害ポテンシャルが存在するのかを明らかにする必要がある。その際、被害推定手法によっては、ただ単に各分析単位内における建物棟数、上水道延長、居住者人口といった各被害ポテンシャルの総量を求めるのではなく、同種の被害ポテンシャルの量を自然外力に対する強度や、1 日の中の時間変化を考慮して、いくつかのカテゴリーに分けて求められることもある。例えば、建物被害ポテンシャルの場合では、構造別・建築年代別に建物棟数を求めることが多い。しかし、そのようなデータそのものを、定期的に全国規模で 1km メッシュ毎に集計している社会・経済統計調査は存在しない。そこで、広域地震被害想定を行う場合には、これらのデータを別途、収集あるいは推計する必要がでてくる。Quake Ver.0.10 では、構造別・年代区分別建物棟数を 1998 年に国土庁が各都道府県及び政令指定都市にアンケート調査して求めている。また、人的被害ポテンシャルに関しては、平成 2 年国勢調査における夜間・昼間人口と、「データブック 国民生活時間調査 1995」(NHK 放送文化研究所, 1995) を元に設定された時間帯別屋内・屋外比率、構造別床面積比率から推計している。消研システム Ver.2 では、国勢調査の地域メッシュデータの「住宅の建て方別住宅に住む一般世帯」に関する項目中、一戸建世帯数、長屋建世帯数、及び 1・2 階建共同住宅世帯数の合計が木造家屋棟数と一致するという仮定を用いている。人的被害の推定に必要な時間帯別・建物構造別屋内人口については、人口総数を世帯数で除した平均屋内人口を用いている。また、長谷川・翠川(1997)、長谷川・翠川(1999)は国勢調査や事業所統計の地域メッシュ統計を利用して、1km メッシュ単位で、構造別・建築年代別に建物棟数を推定する手法を提案している。地震被害想定支援マニュアルに基づいて、火災被害、交通被害、上水道被害を推定する際には、各メッシュ毎の、消防ホース口数、耐火造建物率、道路延長[km]、管種別・管径別上水道管延長[km]を知る必要があるが、これらの推計手法に関しては提案されていないため、推定を行う主体が何らかの形で、準備する必要がある。

3.4. 広域地震被害想定に求められる被害ポテンシャル推定手法の要件

ここまで、広域地震被害想定を指向した、自然外力、および被害ポテンシャルの空間分布の推定手法の現状について、QuakeVer.0.10 および消研システム Ver.2 において採用されている手法を中心にみてきたが、このようなプロセスにより推定された被害は、本来連続的に変化する自然外力の空間分布を 1km メッシュで単純化することによって得られたものである。よって、各メッシュの値そのものよりも、そのメッシュが群として描く被害分布像の方にこそ意味があるといえる。言いかえると、推定結果をある区域毎に集計して、どの区域 X に被害が集中しそうなのか、どの区域まで被害が及びうるのかを把握することが重要となる。従来の被害想定では、その集計単位として都道府県、市区町村といった行政界が用いられている。しかし、1.でも述べたように、行政界といわゆる都市圏とは必ずしも一致しない。よって、人間の営みの空間的連続性を考慮した形での被害像の把握を可能にするため、人間の営みがどのような“都市圏”を形成しているのかを同定できる必要がある。

広域地震被害想定においては、地震外力、液状化、斜面崩壊といった自然外力の空間分布は、国土数値情報の地形・地質情報が利用されることから、1km メッシュ単位での推定が可能である。また、被害ポテンシャル分布の推定も国勢調査、事業所統計のメッシュ統計を基にして、1km メッシュ単位での推定手法が提案されている。よって、本論文で提案する被害ポテンシャル推定手法も、1km メッシュ単位での推定が可能であることが望まれる。国勢調査、事業所統計は 5 年に 1 度の更新頻度で、公表までに 2 年のタイムラグがある。これらのメッシュ統計に基づいて被害ポテンシャルを推定する限りは、推定結果の更新頻度・時期は、メッシュ統計の更新頻度・時期に拘束されてしまう。リアルタイム地震防災システムに被害ポテンシャル分布情報を提供することを考えると、国勢調査、事業所この更新頻度と、公表までのタイムラグを最大限短縮し、準リアルタイムな被害ポテンシャル分布情報をシステムに提供可能にする必要がある。

3.5. DMSP/OLS 夜間可視画像の利用可能性

前節で整理した要件を満たしうる被害ポテンシャル推定手法を開発する上で、本研究では、衛星リモートセンシング技術、中でも DMSP/OLS 夜間可視画像に着目した。DMSP/OLS 夜間可視画像は、短い回帰日数と、高感度のセンサによって、夜間の都市から放たれている光が毎日観測されているという、他の衛星には見られない特徴を持つ。

3.5.1. DMSP 衛星の概要

DMSP とは Defence Meteorological Satellite Program(防衛気象衛星計画)の略で、米国空軍宇宙ミサイルシステムセンター(U.S. Air Force Space and Missile Systems Center(USAF/SMC))によって実施されている計画の名称である。DMSP では気象・海洋環境及び太陽-地球物理環境を観測するための衛星の設計・建造・打上げ・運用が行われている。本論文では DMSP の中で運用される衛星を DMSP 衛星とよぶことにする。2002 年 1 月時点において、F-12, 13, 14, 15 の 4 つの DMSP 衛星が観測を行っている。各衛星は高度約 830km の太陽同期極軌道上を約 101 分の軌道周期で周回している。F-12, 14, 15 は、現地時間における昼間に赤道面を北から南へ、夜間に南から北へよこぎる。F-13 は現地時間における朝方に赤道面を北から南へ、夕方に南から北へよこぎる。

DMSP 衛星は複数のセンサーを搭載しているが、本論文で着目するのはこのなかの光学センサー OLS(Optical LineScan System)である。OLS は雲の観測を目的として搭載されており、近赤外から可視領域(VNIR band: 0.5~0.9 μ m)と、熱赤外領域(TIR band: 10~13 μ m)のふたつの電磁波領域を捉えることができる。以後、近赤外から可視領域において観測されたデータを VNIR データ、熱赤外領域において観測されたデータを TIR データと呼ぶ。走査の幅 Swath(刈り幅)は約 3000km である。走査は、衛星軌道に対し、直角方向に行われる。OLS は 0.55km メッシュの空間解像度での観測が可能であるが、通常の観測では、衛星上で 2.7km メッシュにリサンプリングされる。VNIR 領域および TIR 領域のデータはともに、夜間に赤道面を南から北へよこぎった時点から、1 周分のデータ毎に OIS(OLS Interleaved of Smooth mode)と呼ばれる形式でひとつのファイルに保存される。以後、このデータを OIS データと呼ぶことにする。OIS データにはセンサーが搭載される衛星の名称と、衛星が赤道面を南から北へよこぎった世界標準時にもとづき FnnYYYYMMDDhhmm.OIS という形式のファイル名がつけられる。ここで、Fnn は DMSP 衛星の番号、YYYY, MM, DD, hh, mm, はそれぞれ衛星が赤道面を南から北へ横切った世界標準時における西暦年、月、日、時、分に対応する。たとえば、F15 に搭載された OLS センサーが、F15 が世界標準時 2001 年 10 月 25 日 21 時 39 分に赤道面を南から北へよこぎった時点から観測した OIS データには F15200110252139.OIS というファイル名がつけられる。

観測データは USAF から米国商務省海洋大気局地球物理データセンター(NOAA/NGDC)に送られる。NGDC は、1972 年以来、1992 年までの観測データをフィルムで、1992 年以降はデジタルデータで保管している。また民間へのデータ提供も行っている。データ提供は、OIS データそのものに加え、OIS データを VNIR データ、TIR データごとにジオロケーションを行ったデータも提供している。NGDC のジオロケーション・プログラムには、衛星軌道・高度、センサーの角度、海表面モデル、地表面標高データから測地情報を計算し、30 秒角メッシュ(約 900m メッシュ)にリサンプリングする方法が採用されている。その精度は F12 から観測された画像の場合、 ± 1 ピクセル、F14 から観測されたデータの場合、数ピクセルであることが報告されている。

2000 年 7 月 1 日より、農林水産省農林水産研究計算センターが NOAA/NGDC から即時提供される東アジア・東南アジア・オセアニア・南アジアに関する、NOAA, GMS(ひまわり)、そして DMSP の地球観測データを、インターネットを介して無償で加工・提供するサービス(農林水産省能楽情報支援システム(AGROPEDIA)/農林水産衛星画像データベースシステム(SIDaB))を開始した。SIDaB の出現により、DMSP 衛星の観測データをより手軽に利用できるようになっている。上記以外の地域に関しても、NOAA/NGDC が 1OIS データを 8 ドルで提供している。これは、他の衛星画像に比べても極めて安い。

以上のような、DMSP/OLS 夜間可視画像がもつ解像度、画像の更新頻度の高さ、そして、観測データの利用の手軽さといった特徴は、被害ポテンシャル推定手法に求められる継続的なモニタリングの要件を満たすものである。

3.5.2 夜間可視画像の特徴

VNIR データのうち夜間撮影されたものが、本論文でいう夜間可視画像である。図 3-3.ab に OIS ファイル内の VNIR データ部とジオロケーションが施された VNIR データの例をしめす。図 3-3a は、日本標準時 2002 年 1 月 5 日 20 時 31 分から 20 時 50 分(世界標準時 11 時 31 分から 11 時 50 分)に観測された日本列島周辺の VNIR データの例である。日本の諸都市の位置に対応して、光が観測されているように見える。これを、NOAA/NGDC から提供していただいたジオロ



図2-3.a OISファイル内のVNIRデータ部の例 F14から 2001年1月26日に観測されたVNIRデータ部 (F14200101261117.n.OIS)観測は,赤道から北上しながら行われる。従って,南北が逆転した状態でデータが記録される。

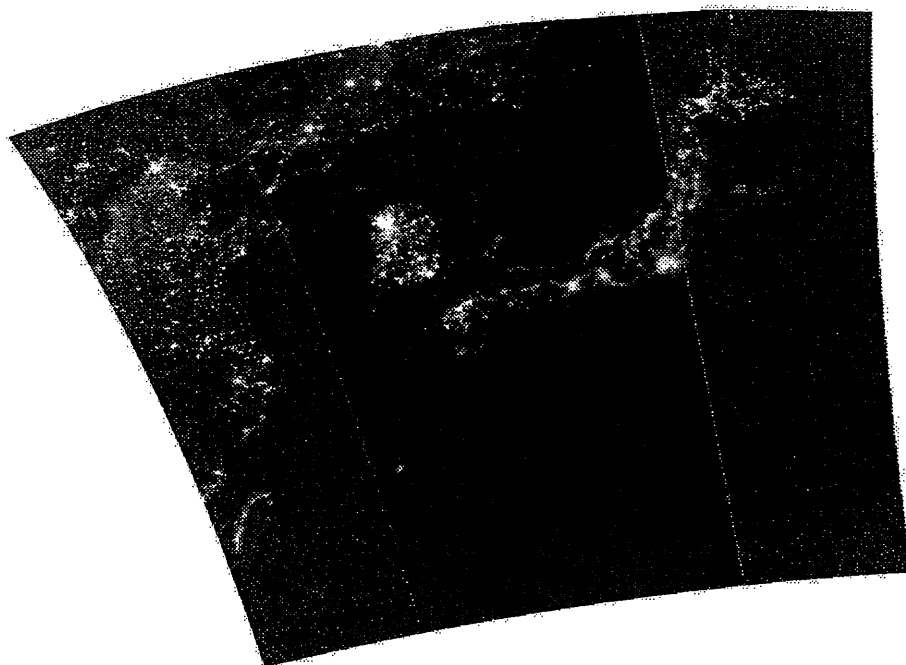


図2-3b ジオロケーションが施されたVNIRデータ部の例図2-5.a)に示すデータの日本
周辺について地理情報を与えたもの

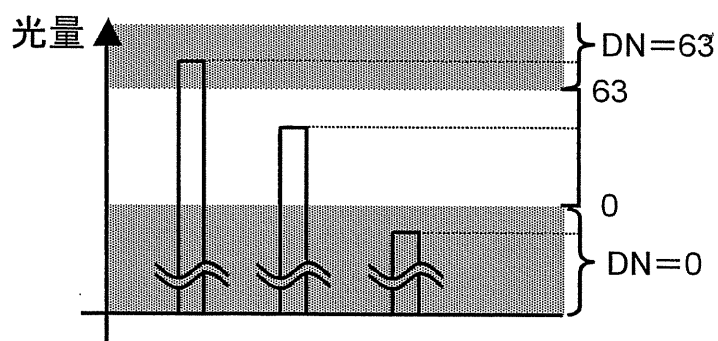


図2-4 VNIRセンサーのゲインのしくみ

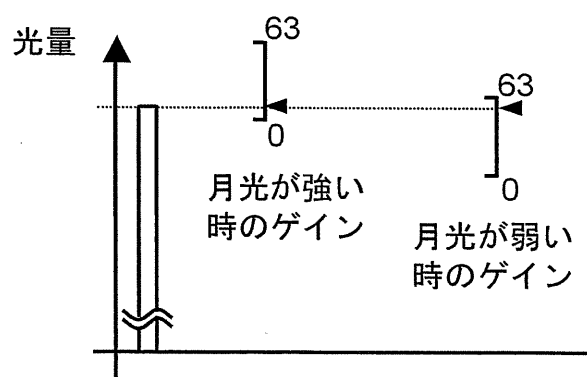


図2-5 VNIRセンサーの月齢に伴うゲイン調整

ケーションプログラムによって、位置情報を与えたものが、図 3-3.b である。

VNIR センサーに観測される光の強さは、1 ピクセルのデータ長が 6bit, すなわち 0~63 の相対値で記録される。図 3-4 にしめされるように、設定されたゲインに収まる光の強度に対し 1~63 の整数値(以後 DN ; Digital Number とする)が与えられ、ゲインの上限値よりも大きな光の強度には 63, ゲインの下限値よりも小さな光の強度には 1, 観測に失敗した場合 0, が与えられる。VNIR センサーの本来の目的は、月光を反射する雲の分布を捉えることである。月光の強さは月齢や月の高度の変化に伴って変化する。新月期や月が地平線下に沈んでいる地域においても雲の像を常に鮮明に捉えるために、図 3-5 にしめすような月に伴う自動的なゲインの調節が行われる。そのため、月光が弱い期間においては、都市中心部などで光の観測値が DN=63 に飽和してしまう傾向がある。また、ある地点の恒常的な光源を、ゲインの異なる 2 時点において撮影すれば、異なる DN 値で記録されることになる。ゲイン設定の変更は USAF のみがおこなえる。

DMSP 衛星の特長の 1 つは、1.0 日という短い回帰周期により、毎日地球上の任意の点に対して観測データが得られることである。もう 1 つの特長は、夜間のセンサーの感度の高さである。夜間月光に照らされる雲のすがたを捕捉するため、PMT(Photo-Multiplier Tube : 光電子倍增管)が夜間の撮影にもちいられる。PMT により最低 $10^{-9} \text{watts/cm}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ までの光をも捕捉することが可能である。この感度は NOAA/AVHRR や Landsat/TM の 1 万倍の感度であり、夜間の都市が放つ光という、他の衛星画像にない特異な情報を収集できる。この特徴も、被害ポテンシャル推定手法に求められる都市圏の同定を可能にすると考えられる。

4. 測定論にもとづく都市光分布モデル作成手法の提案

本研究の目的は、単に DMSP/OLS 夜間可視画像を用いて都市光の分布を知ることではなく、それを被害ポテンシャルの推定に応用することにある。既存の都市光分布モデルの作成手法は必ずしも被害ポテンシャルの継続的なモニタリングに適しているとは言いがたい。そこで、既存の都市光分布モデル作成手法の問題を整理すると共に、被害ポテンシャルの継続的なモニタリングへの応用を意識した都市光分布モデル作成手法（測定論モデル）の提案を行う。さらに、測定論モデルの都市光分布モデルとしての精度を検証し、既存の都市光分布モデルと同等の都市捕捉率を持っていることを示す。

4.1. 都市光観測データとしての DMSP 夜間可視画像

DMSP 夜間可視画像は地表面上に存在するさまざまな光源が、さまざまな観測条件のもとで観測された結果である。光源は自ら光を放射する一次光源と一次光源から放射される光を反射・散乱する二次光源に分類できる。一次光源としては、都市光、焼畑・森林火災・油田の炎、誘魚灯、雷などが、二次光源としては月光を反射する雲、水面のさざなみ、地表の雪氷などが考えられる。VNIR 画像の中でこれらの一次光源、二次光源の中から都市光を弁別することは非常に難しい。図 4-1 は、1996 年 1 月 27 日における日本上空の画像である。この画像では、北陸から北海道にかけて、雲に都市光が覆われているが、どこまでが都市光でどこからが、月光に照らされた雲なのかを判読することは難しい。

一方、観測条件は大きく、技術的要因、大気・気象要因の 2 つにより変動する。DMSP 夜間可視画像に捕捉される光源の強さ・位置と、それらの観測値に影響を与える観測条件との関係を図 4-2 に示す。技術的要因とは、DMSP 衛星のセンサーの機能、軌道といった観測機構に起因する観測条件の変動要因である。2 章でも述べたように、月齢や月の高度に合わせて、ゲインが調節される（図 4-2 中 Along Scan Gain Control）ため、見かけ上都市光が増減したように見える場合が考えられる。また、ゲイン設定が高くなると、センサーにひろわれるノイズも増えるため、小規模の都市と紛らわしい光源が増える。DMSP 衛星は地表面を進行方向と直交方向に走査するが、高度約 830km に対して、刈り幅（Swath）が約 3000km と広いため、衛星直下と走査端部では、走査角、有効瞬間視野(EIFOV:Effective Instantaneous Field of View)が大きく異なる。走査端部における EIFOV の膨張を抑えるため、走査角に応じてセンサー口径の切替も行われている。衛星直下と走査端部では、光が透過してくる大気厚も大きく異なるので、大気によって光が散乱・吸収される程度も異なる。太陽と衛星の位置関係によって、太陽光が衛星の機体の一部に反射してセンサーに入射し、観測値が飽和(DN 値=63)するグレアという現象も発生する。グレアの発生位置は季節とともに移動する。北半球では、7,8,9 月に中緯度地帯で発生し、10,11,12 月にかけて徐々に北上する。1,2,3 月に北上のピークを迎えた後、4,5,6 月は南下して、夏に中緯度地帯に戻ってくる。何らかの要因で、1 本以上の走査線のデータが欠落することもある。その他プラットフォーム固有の姿勢・軌道の揺らぎも光の観測強度・位置に影響を与える。

気象要因とは、気象に起因する観測条件の変動要因である。厚い雲は観測されるはずの都

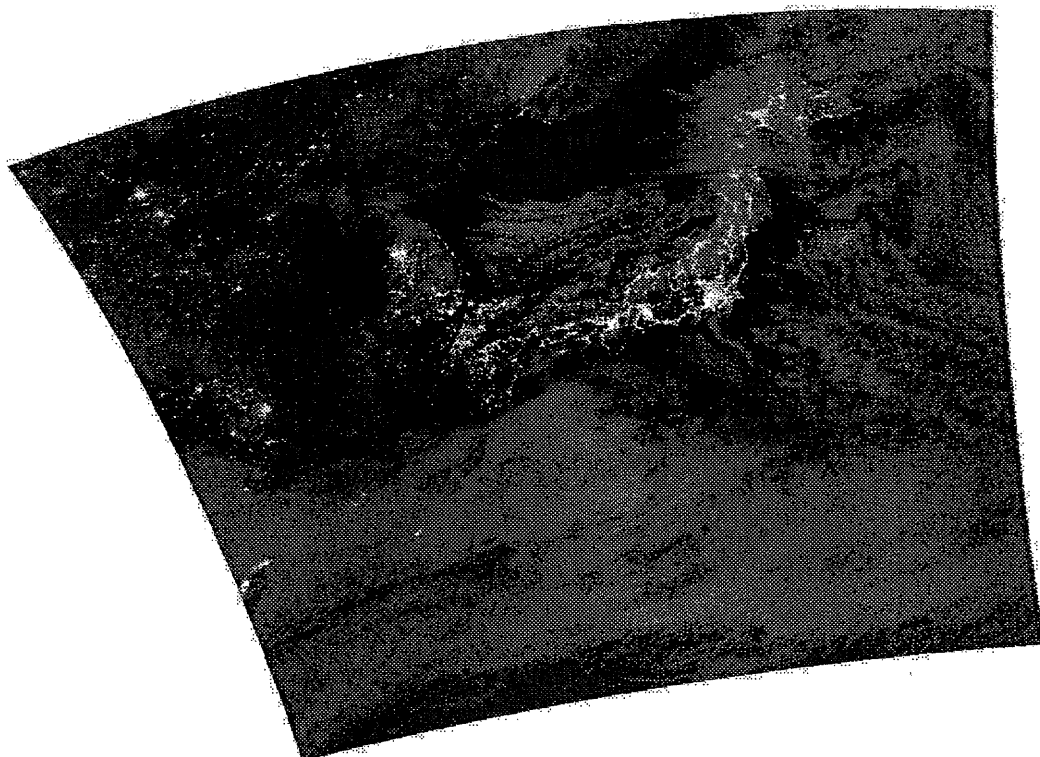


図4-1 1996年1月27日にF12から観測された日本上空の画像 1996年1月24日～2月7日、九州から北陸地方は大雪にみまわれた。この画像では、特に北陸から北海道にかけて都市光が雲に覆われており、都市光と月光に照らされた雲の判別は難しい。(F12199601271158.nj.OJS)

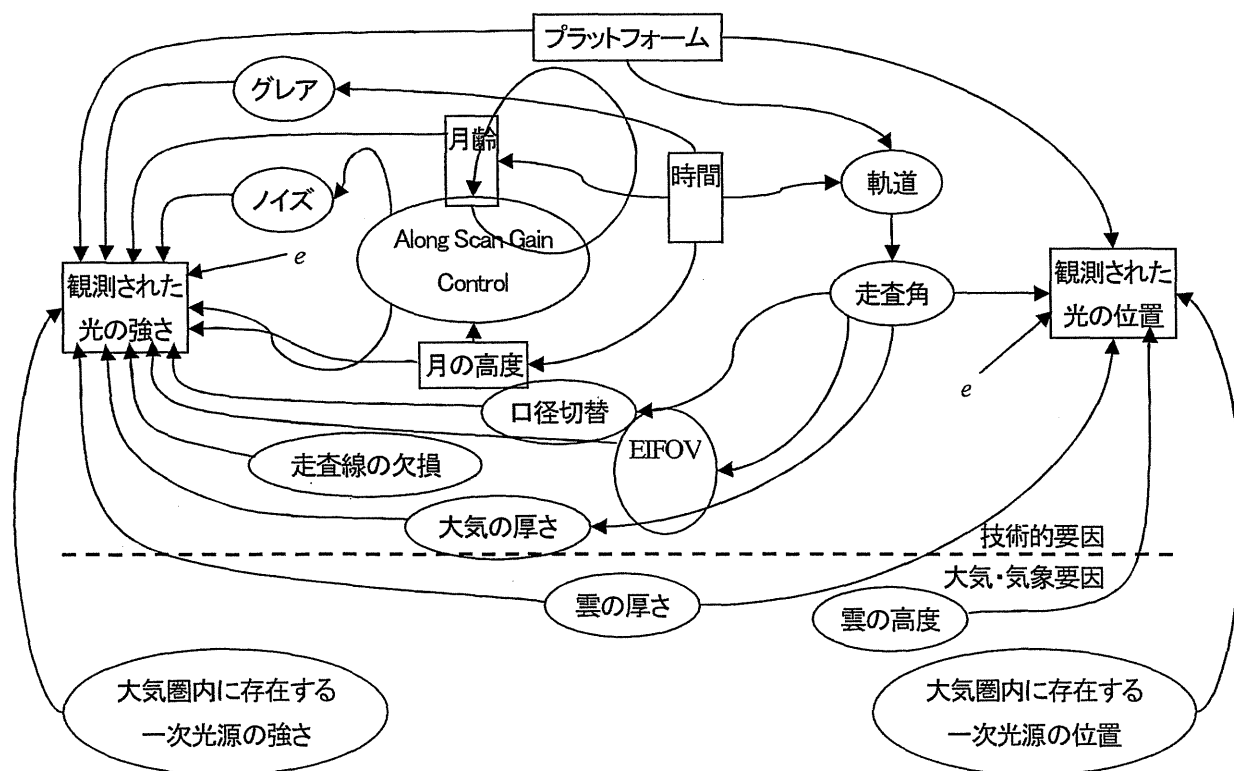


図4-2 DMSP夜間可視画像に捕捉される一次光源の強さ・位置に影響を与える要因相互の関係

市光を遮ってしまう。一方薄い雲は、都市光を散乱させ、都市光を減衰させると共に、都市の大きさを見かけ上大きく見せてしまう。都市光の雲による散乱を走査線の両端付近で捉えた場合には、見かけ上、衛星直下から遠方側に都市が動いたように見える。

このように、DMSP 画像は都市光を含むさまざまな光源をさまざまな観測条件下で捕捉している。その中からどのように都市光強度を推定するかが問題となる。

4.2 既存の都市光分布モデルとその問題点

夜間可視画像を用いて、夜間の全球モデルをつくる試みは、観測データがフィルムに保存された時代から行われてきた。ただ、DMSP 夜間可視画像を都市光観測データとして用いる際には、3.1.3.で指摘した点に注意する必要がある。以下、代表的な4つの全球モデルの作成方法を、各手法においてこれらの注意点がどのように考慮されているかという観点から整理する。

4.2.1. Sullivan(1989)による10km解像度夜間全球モデル

最初の夜間の地球の全球モデルは、Sullivan(1989)によるものである。Sullivan(1989)は、全球モデルの部品として、1974年から1984年の月明かりのない期間における観測画像フィルムのプリント写真から、雲のない40のエリアを選択して複写したものと、すでに他の研究において作成されていた地域的な夜間の都市光分布写真を用意し、手作業で張り合わせて夜間の全球モデルの写真を作成した。画像の位置合わせ、どの都市かが判別可能な特徴的な都市光を地上基準点として用いている。夜間の全球モデルの投影法には、メルカトル図法が採用されている。

Sullivan(1989)の手法では、雲の有無の判断基準が明確にされておらず、成果物に作業者の主観が入りうる。光の同定に何枚の観測画像フィルムが利用されたかは、明示されていないが、用いられた観測画像の数から考えて、1枚から数枚であると考えられる。月明かりのない期間の観測画像を用いているため、微弱な都市光まで捕捉していると考えられるが、用いられた観測画像フィルムの数から考えて、その都市光の位置、強さが真の都市光の位置、強さをどれだけ反映したものかには疑問が残る。特に位置に関しては、写真データを元に加工を行っているため、幾何補正が難しく、特に高緯度地帯で画像のひずみが大きいものと考えられる。1974年から1984年の間に観測された画像のうち、たまたま、ある数枚に観測された光を元に作成されているという意味で、1974年～1984年の10年間における夜間の地球の概観を示したモデルといえる。

4.2.2. 中山・他(1993)によるDMSP 全球夜間映像

中山・他(1993)は夜間の光の分布状態、種類、変化等を詳細に調べることを目的として、デジタルデータの夜間全球モデルを作成した。作成に用いる観測画像として、1985年から1989年の間の観測画像フィルムのプリント写真から、光が比較的多く分布する地域に関して、光の分布が明瞭に示されている38シーンが選択された。ただし、うちニュージーランド周辺の1シーンについては、1985年から1989年の間に雲などの影響で良いシーンの選択が困難という理由から、1977年に撮影された画像が用いられている。それらのフィルムデータはスキャナで読みとられ、デジタルデータに変換され、光路輝度補正、投影変換・幾何補正を施された後、接合された。光路輝度補正は、DMSP/OLS 観測画像データの衛星直下から走査端部にいくに従いDN値が系統的に高くなる傾向を、補正するものである。このDN値の走査方向の系統的な傾向は、走

査角度の違いに伴う、光路長の違いが大部分であるとしている。全球モデルの投影法には、正方形図法が採用されている。投影変換・幾何補正では、各シーンで 14~41 の都市光の中心点を地上基準点として、デジタル化された画像の各ピクセルの緯度経度を計算された後、経度方向（西経 180° ~ 東経 180°）5000 ピクセル、緯度方向（北緯 90° ~ 南緯 90°）2500 ピクセルのメッシュ（赤道上における 1 メッシュの大きさは約 8km）に、最近隣内挿法によってリサンプリングが行われている。接合の際には、リサンプリングされた各シーンについて、光以外と考えられる部分の平均値を求め、シーン間においてこの値がほぼ等しくなるように、各シーンを補正している。これにより、シーン間のゲインの違いがある程度補正されているものと考えられる。また、複数のシーンが重なり合うメッシュについては、DN 値が最も大きいものを用いている。

中山・他(1993)では、光路輝度補正と接合時のゲイン補正を行うことで、観測条件の技術的変動要因に対応している。位置情報に関しては、デジタル化により、幾何補正が容易になり、経度方向、緯度方向ともに、0.5~1.5 ピクセルの誤差にとどまっている。ただ、雲の有無の判断基準は明示されておらず、作業者の主観が入りうる。各メッシュの光の同定に用いられるシーンの数も 1~5 シーンと少ないため、観測条件の大気・気象要因をどこまで考慮できているか疑問である。また作成に、主に 1985 年から 1989 年の 3 年間のさまざまな時期に観測された 38 シーンが用いられており、どの時期の夜間の地球をモデル化したものかが明確ではない。その意味で、中山・他(1993)の全球モデルは、Sullivan(1989)の全球モデルがデジタル化され、位置精度が向上したものと位置付けられる。

4.2.3. Elvidge ら(1997a,b,1998)による"Stable Light"

1992 年に観測データがデジタルデータとして記録されるようになってからはデジタルデータを利用した夜間全球モデルの作成が行われるようになった。Elvidge ら(1997a,b,1998)は、1994 年 10 月から 1995 年 3 月の間の、月の輝面比が 0.5 以下の期間に観測された OIS データを用いて、全球の都市光の観測頻度をしめす "Stable Light" を作成している。利用される OIS データに対しては、グレアの除去と、雲の除去が行われる。OIS データ中、任意の 40×40 のピクセルが全て飽和していた、すなわち DN 値=63 であった場合、そのピクセル群はグレアと判定され除去される。また、TIR データ部と照合して、目視で雲と判定されるピクセル群を除去する。雲とグレアが除去された画像に対し、都市光部分と都市光でない部分（背景部分）を分離するため、閾値の設定が行われる。閾値は 20×20 ピクセル領域ごとに設定される。20×20 ピクセル領域を包含する、50×50 ピクセルの領域における DN 値のヒストグラムが求められ、その形状から 20×20 ピクセル領域に対する閾値が設定される。この閾値に基づき背景部分が決定され、この部分においては、都市光が観測されなかったものとされる。都市光が抽出された画像は、NGDC のジオロケーションプログラムにより、30 秒×30 秒メッシュにリサンプリングされる。ここまでの作業が、全ての OIS データに関して行われ、作成された都市光画像群を元に、各 30 秒メッシュごとに、観測画像が得られた数に対する都市光が観測された数のパーセンテージが計算される。このパーセンテージを 0~100 の整数値で表示したものが、Stable Light である。同様の方法で、緯度に関わらず面積が等しく投影される、グード・ホモサイン図法に 1km メッシュで投影したものも作成されている。

Stable Light では、衛星軌道、観測角、標高、海水面モデルを考慮したジオロケーションを用いているため位置の誤差は 1 ピクセル前後、赤道上で約 0.9km 前後となっている。中山・他(1993)の全球モデルの誤差は約 1 ピクセル前後、赤道上で約 8km 前後であったことから、位置精

度は中山・他(1993)よりも向上しているといえる。また、利用する観測画像の期間も絞られており、どの時期の夜間の全球を表現したものが明確にされている。一方、6ヶ月間の観測画像を用いているが、雲の有無の判定は、目視によるため、成果物に作業者の主観が入りうる。また、都市光を抽出する閾値の設定方法の根拠も明確ではない。

4.2.4. Elvidge ら(1999)による“Radiance Calibrated City Light”

DMSP/OLSは打上げ前に、ゲイン設定、観測されたDN値と観測される光の放射輝度の関係が明らかにされている。よって、観測画像のゲイン設定があきらかになれば、都市光の物理的な強さを求めることが可能になる。このことを利用して、Elvidge ら(1999)は、都市光の物理的な強さ(放射輝度)の分布“Radiance Calibrated City Light(以下 RCCL)”を作成した。RCCL作成にあたっては、まず米国空軍に、1996年3月16日～23日、1997年1月5日～14日そして1997年2月3日～12日の期間、通常とは異なるゲイン設定下での観測を依頼している。この期間は、各月において最も月明かりの弱い期間に対応する。非常に弱い都市光から、強い都市光までを漏らすことなく、かつ飽和することなく補足するよう3段階のゲインを交互に用いて観測が行われた。観測されたOISデータに対して、Stable Lightの作成の際と同様の方法で、グレア・欠損した走査線のデータ・雲の除去と、閾値設定が行われ、都市光が抽出される。都市光が抽出された画像は、NGDCのジオロケーションプログラムにより、30秒×30秒メッシュにリサンプリングされる。得られた都市光画像群について、事前に判明しているゲイン設定、観測DN値、観測光の放射輝度の関係から、30秒メッシュごとに観測期間中の都市光の放射輝度の平均値が求められる。この放射輝度を、0～255の整数値に変換したものが、RCCLである。RCCLの日本周辺部分^{補注①}を図43に示す。

同じジオロケーションプログラムを用いているため、Stable Lightと同様の位置精度が得られている。また、光の有無だけでなく、その物理的な大きさ(放射輝度)が明らかになっている点が、これまでの全球モデルとの大きな違いである。一方で、作成に米空軍にゲイン設定の変更を依頼しなければならず、通常の観測態勢の中で得られる画像を利用できないという点で、常時の都市光モニタリングには適さない。また、過去の通常の観測態勢の中で得られた画像資源を利用することができない。雲の除去に関しても、Stable Lightと同じ手法に基づいているため、成果物に作業者バイアスが入りうることはいない。また、都市光抽出の閾値設定の根拠も不明確である。

4.2.5. 既存の都市光モデルの問題点

本研究の狙いはDMSP夜間可視画像が日々捉える都市光を用いて、グローバルな被害ポテンシャルの空間分布を継続的にモニターする手法を開発することである。しかし、前節までに整理してきたように、既存の夜間全球モデルの作成手法を、都市光抽出手法として採用するには、様々な点で問題がある。現在は全ての観測データが、デジタルで管理されているため、フィルムデータを対象としたSullivan(1989)、中山・他(1993)の手法は採用できない。Stable Light及びRCCLは、デジタルデータを対象とした手法ではあるが、目視と手作業による雲・ノイズの除去作業が必要であるため、作成に要する人的コスト・時間コストが高く、リアルタイムなモニターには適さない。また、DMSP夜間可視画像以外に、夜間の都市光をグローバルに捉えた情報は存在しないため、除去した雲・ノイズが本当に雲・ノイズであったのかは検証が不可能である。訪れたことすらない地域の、しかも、見たことのない角度からの都市光の分布を、作業者が目視で、雲・

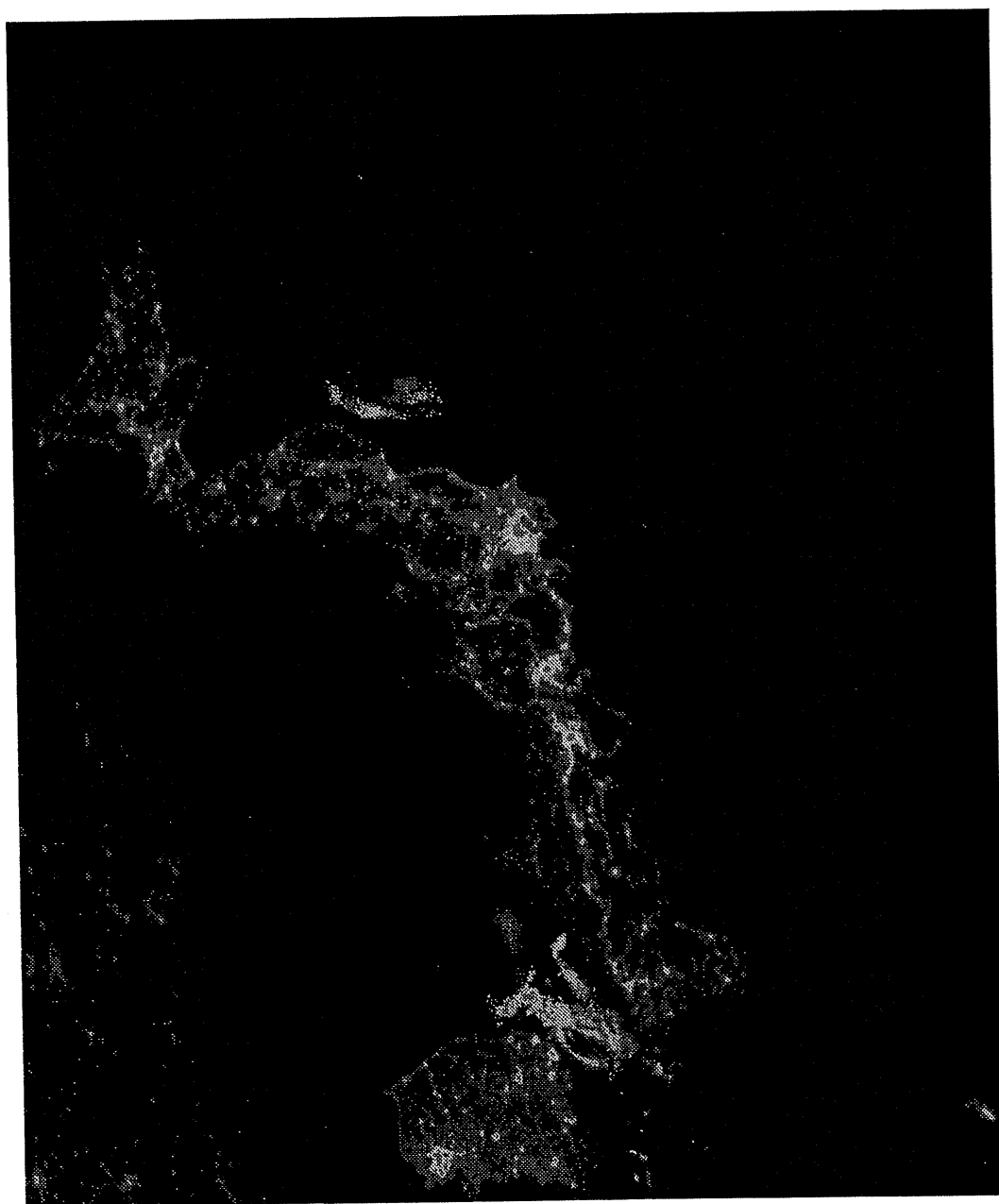


図4-3 E-Edge(1999)らが作成したRadance Calibrated City Lightにおける日本周辺の画像(1996年3月及び、1997年12月の画像から作成)

ノイズから弁別しなければならない手法には、作業者のもつ世界地理に関する知識・感覚によるバイアスを大いに含みうる。加えて、RCCLを作成する場合、米空軍に通常とは異なる観測態勢を要求しなければならず、継続的なモニターには不向きである。

4.3. 都市光分布の重ね合わせモデルの提案

本研究において、都市光分布モデルを作成するのは都市光の物理的な強さを知るためではなく、都市光の空間的配置とその強さから類推される当該地域の人口や建物棟数といった被害ポテンシャルの空間分布を知るためである。被害ポテンシャルの空間分布と都市光分布の関係を分析する限りにおいては、必ずしも、都市光分布モデルを物理的な強さの分布で表現する必要はなく、都市光強さの地域間の相対的な関係が指標値として得られれば十分である。

そこで、本研究では、長期間にさまざまな観測条件下で撮影された大量の画像を足しあわせて、観測条件の違いをキャンセルアウトし、当該期間を代表する都市光強さの指標値を得ることを考えた。池田(1971)では測定値 X を、真の特性値（真値） T と測定誤差 E の和として、式 3-1 のように定義している。

$$X = T + E \quad [3-1]$$

E は偶然誤差であり、ある一つの対象を繰り返し測定した場合、 E の平均は 0 となる。よって、式 3-2 に示すように、ある一つの対象を繰り返し測定して得られた測定値の平均 μ_X は真値の平均 μ_T に等しくなる。

$$\bar{X} = \bar{T} + \bar{E} = \bar{T} \quad [3-2]$$

3.1.において述べた観測条件の変動要因は、その変動特性から大きく 1) 周期変動要因と 2) 不規則変動要因の 2 つに分けられる。図 4-2 で示したように、技術的要因のうち、走査角、EIFOV、口径切替、大気の高さ、Along Scan Gain Control、ノイズは、軌道、月齢、月の高度といった周期的に変化するものによって規定されているため周期変動要因として考えることができる。また、走査線の欠落はランダムに現れるものであるため、不規則変動要因として考えられる。自然・気象要因は、気象にまつわる要因であるため、大域的には周期変動をすると考えられる。ただ、局所的に、ある地点を、どの程度の厚さの雲が覆うか、あるいはどの地点で雷が発生するかはランダムな事象と考えられる。よって、自然・気象要因は、周期変動と不規則変動が複合したものとして考えられる。このように光源の観測条件に影響を与える要因のほとんどは、周期変動か不規則変動をするものと考えられる。よって、DMSP 画像に捉えられる光の観測値は、1) 都市光のような安定した光源、2) 月光を反射する雪などの周期的に現れる光源、3) 月光を反射する雲、水面のさざなみ、漁船団、焼畑、雷といった不規則に現れる光源、4) 周期的な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分、5) 不規則な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分の和として式 3-3 のようにあらわされる。

$$X_{k,n} = T_{k,n} + L_{C,k,n} + L_{R,k,n} + C_{k,n} + R_{k,n} \quad [3-3]$$

ここで、 $X_{k,n}$ ：ある観測画像 n における地点 k の観測値

$T_{k,n}$ ：定常的に存在する光源の強さ

$L_{C,k,n}$ ：周期的にあらわれる光源の強さ

$L_{R,k,n}$ ：不規則にあらわれる光源の強さ

$C_{k,n}$ ：周期的な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分

$R_{k,n}$ ：不規則な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分

$L_{Rk,n}$ $R_{k,n}$ は(1)式における偶然誤差に相当する。よって、同じ地点の観測値を周期変動の周期の倍数分重ね合わせ、その平均をとることで、 $L_{Rk,n}$ $R_{k,n}$ の時間変動はキャンセルアウトされる。その結果、式 3-4 に示すように、観測値の平均値は、定常的に存在する光源の平均値と、周期的に現れる光源の平均値、そして周期的な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分の平均値の和に等しくなる。

$$\frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} X_{k,n} = \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} T_{k,n} + \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} L_{C,k,n} + \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} L_{R,k,n} + \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} C_{k,n} + \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} R_{k,n} \quad [3-4]$$

ここで、 $N_{t,T}$ ：時点 t から始まる期間 T における観測画像の数

ここで、次の仮定を導入する。

「 $N_{t,T}$ が十分に大きい場合、期間 T 中に周期的に現れる光源の平均値、そして期間 T における周期的な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分の平均値は k 、 t に依存せず一定である。」
この仮定は、式 3-5 のように定式化できる。

$$\frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} L_{C,k,n} = L_{C,0}, \quad \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} L_{R,k,n} = L_{R,0}, \quad \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} R_{k,n} = R_0, \quad \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} C_{k,n} = C_0 \quad [3-5]$$

ここで、 $L_{C,0}$ $L_{R,0}$ C_0 R_0 ：定数

この仮定の導入により、左辺観測値の平均値の増減は、右辺の定常的に存在する光源の平均値の増減のみを反映することになる。すなわち、式 3-6 に示すように、観測値の平均値を都市光強さの指標とすることができる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} X_{k,n} &= \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} T_{k,n} + L_{C,0} + L_{R,0} + C_0 + R_0 \\ \bar{X}_{t,T,k} &= \frac{1}{N_{t,T}} \sum_{n=1}^{N_{t,T}} X_{k,n} \end{aligned} \quad [3-6]$$

ここで、 $\bar{X}_{t,T,k}$ ：時点 t から始まる期間 T における観測画像から得られた地点 k の都市光強さの指標

表 4-1 に、図 4-2 に示した各種観測条件変動要因の変動パターンを整理したものを示す。この図より、期間 T として、365 日をとることにより、周期的な観測条件の変化の成分はほぼ除去できることがわかる。本論文では以上のような手法で推定された都市光分布を、測定論モデルと呼ぶことにする。このようにして得られる測定論モデルの 1 ピクセルは 30arcsec メッシュとなるが、2 章で述べた通り、本論文では、3 次メッシュ単位での被害ポテンシャルの推定を目指す。そこで、本論文では、測定論モデルを 30arcsec メッシュから、3 次メッシュへリサンプリングしたものを分析に用いた。

測定論モデルの作成では、RCCL のようにゲイン調節を必要としない。そのため、通常の観測から得られた画像をもとに、任意の時点 t から始まる期間 T について都市光分布モデルの作成が可能である。このことは、日々得られる DMSP 画像をもとに都市光分布モデルを更新し、最新の都市光分布の状況を知ることができることを意味しており、被害ポテンシャルのモニタリングの上で必要とされる要件である。

4.4. 日本の都市光分布の重ね合わせモデルの作成

3.3. で述べた重ね合わせモデルの考え方にに基づき、2000 年における日本の夜間の都市光分布モデル「Japan at Night 2000」を作成した。作成に当たっては、2000 年の 1 年間に F14 から観測された画像を用いた。データは SIDaB にデータベース化されているものを用いた。2000 年の時点では図 4-4 はこのような測定論モデルの考え方にに基づき、F14 が観測した 2000 年の 1 年間に観測された 277 日分の観測画像を重ね合わせて作成した日本の夜の都市光分布モデル (Japan at Night 2000) である。重ね合わせモデルでは特に雲やノイズの除去を行っていないが、RCCL と同様に鮮明な都市光分布が得られた。周期変動成分の変動周期は、月・太陽の運動、DMSP 衛星の運動に規定されるものであるため、1 年間の画像の平均をとることにより、周期変動成分もキャンセルアウトできる。図 4-5 に、2000 年における 1 月 1 日～ n 月末までの平均画像と 1 月 1 日～ $n-1$ 月までの平均画像の差分の標準偏差をしめす。利用する観測画像を増やすことにより、画像が安定していくことが確かめられた。

4.5. 測定論モデルの都市光分布モデルとしての精度

測定論モデルと RCCL の都市光分布モデルとしての精度を比較した。都市光分布モデルとしての精度とは、どれだけ確実に都市から発せられる光を捕捉しているかということである。一般に、都市を定義し、ある一定の尺度によって都市と都市ではない地域の境界を画定することは極めて困難であるとされている (高橋・他(1997))。しかし、明らかに都市中心部に存在するものを挙げることは可能である。例えば、ある地点に地方政府庁舎、地方議会議事堂、オフィス街、歓楽街、密集住宅街といったものが存在すれば、少なくともその地点は、都市中心部に属しているといえるであろう。精度の良い都市光分布モデルであれば、少なくとも、これらの都市中心部を構成するものを都市光分布内に捕捉できるはずである。そこで、ここでは、市町村庁所在地が都市の規模によらず都市の中心付近に位置するものと仮定し、ふたつの都市光分布モデルについてどれだけ多くの市町村庁所在地を都市光分布内部に捉えられているかを比較した。

RCCL は 1996 年 3 月及び 1997 年 1、2 月の夜間可視画像を元に作成されている。そこで、

表4-1 各種観測条件変動要因の変動パターン

観測条件の変動要因		従属する要因	変動パターン
技術的要因	軌道	走査角, EIFOV, 口径切替, 大気の厚さ	8.5日周期*1
	グレア	—	365日周期
	月齢	Along Scan Gain Control, ノイズ	約29日周期
	月の高度	Along Scan Gain Control, ノイズ	約354日周期*2
	走査線の欠損	—	ランダム
気象要因	雲の厚さ	—	365日周期(大域的) ランダム(局所的)
	雲の高度	—	365日周期(大域的) ランダム(局所的)

*1 DMSP衛星の周期を102分とした場合の理論値

*2 一日の内のある時刻における月の高度は, 約29日周期で極大値・極小値をとる。29日周期ごとの極大値・極小値は, 約354日周期で極大値・極小値をとる。354日周期ごとの極大値・極小値は, 約10年周期で極大値, 極小値をとるが, 本論文では, この10年周期の変動は無視した。

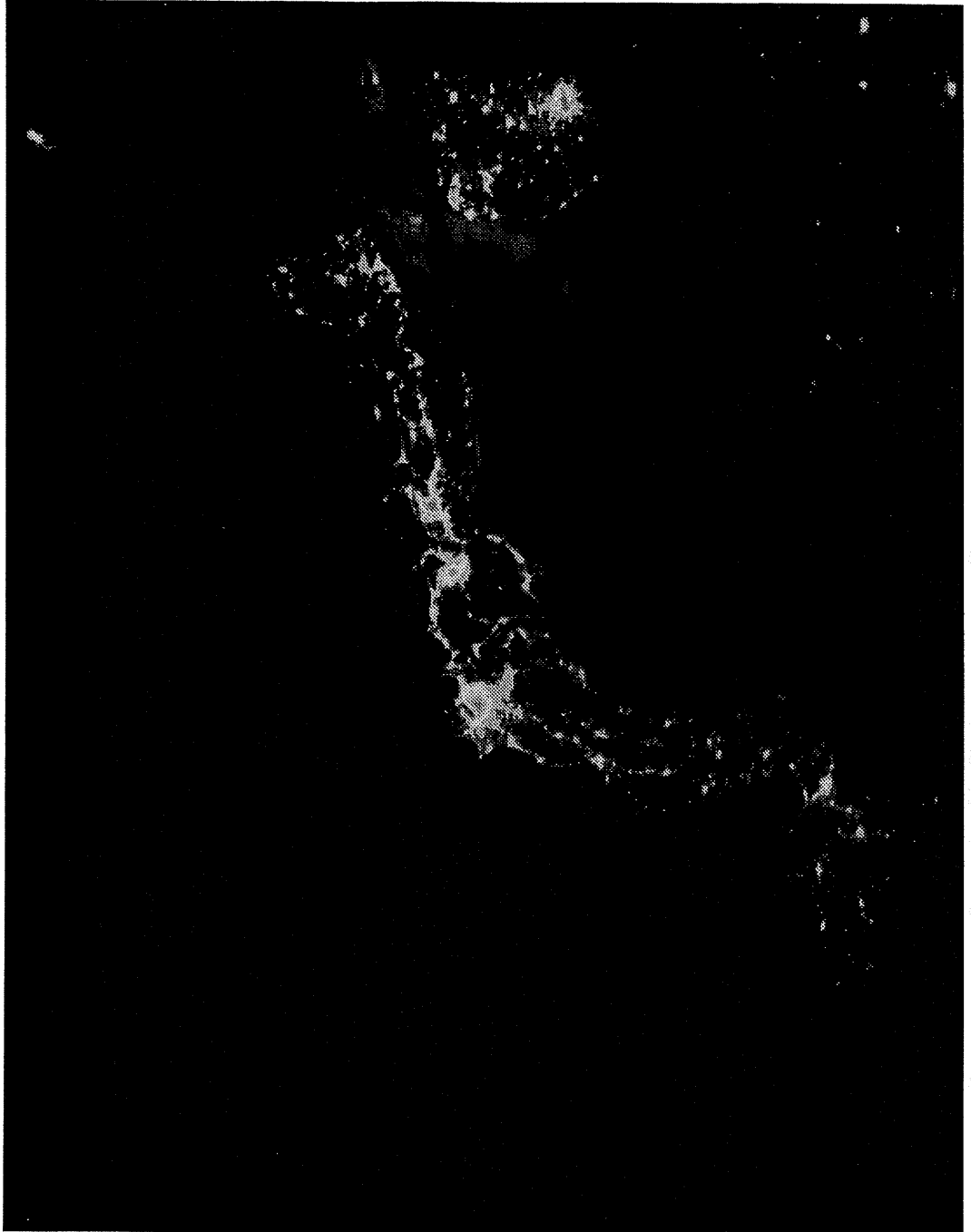


図3-4 2000年の日本周辺の都市光分布の測定論モデル(2000年1年間の観測画像から作成)

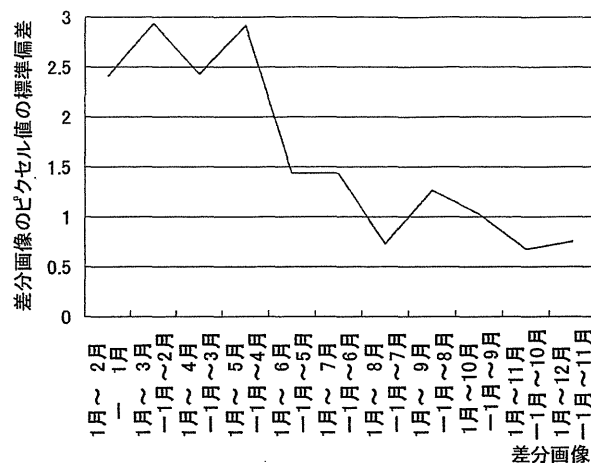


図4-5 2000年における1月～n月までの平均画像と1月～n-1月までの平均画像の差分の標準偏差

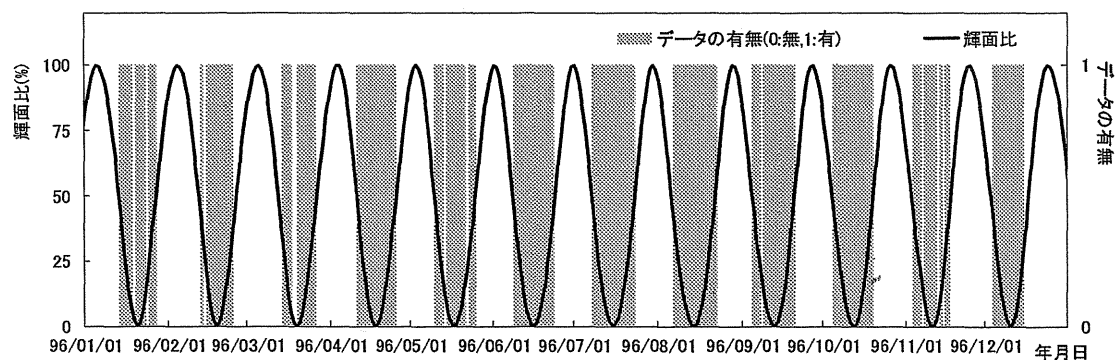


図4-6 SIDAblにおけるF12が1996年に観測した夜間可視画像の整備状況とつきの輝面比との関係

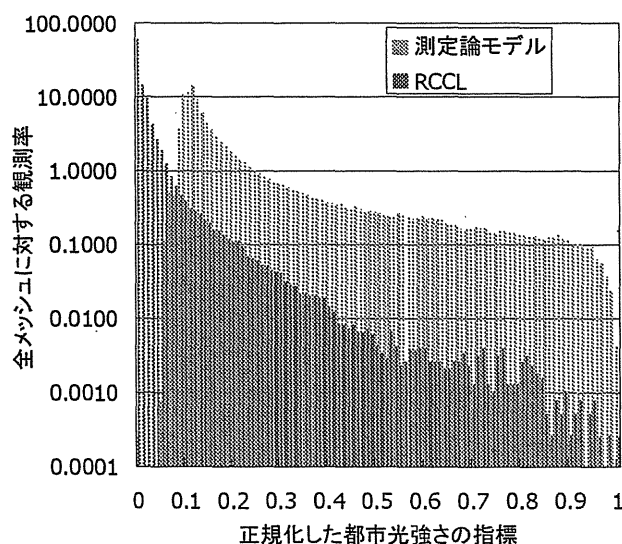


図4-7 測定論モデルとRCCLの都市光強さのヒストグラム(比較のため、両モデルにおける都市光強さの最小値を0.0,最大値を1.0として正規化した。)

1996年の1年間に観測された画像から日本周辺における測定論モデルを作成し、RCCLとの比較に用いた。ただし、図4-6に示すように、SIDaBにある1996年の観測画像は162日分で、そのほとんどが新月期に対応していたため、測定論モデルの補正を行った^{補註(2)}。Japan at Night 2000同様、1996年の測定論モデルの作成にも、SIDaBのデータを利用した。図4-7は、測定論モデルとRCCLの都市光強さのヒストグラムを示したものである。RCCLはあくまで、都市を光源とする光の強さの分布を求めることに主眼をおいている。よって、RCCLには都市光=0の地域、すなわち都市光の観測されない地域が存在する。その一方、測定論モデルは、夜間に観測される光源のうち安定して観測される光の強さを、多数の観測画像の重ねあわせにより求めている。その意味では、厳密に都市部が放つ光だけを捕捉しているわけではなく、開発の及んでいない山間部であってもある一定の光の強さを持つことになる。よって、測定論モデルにおいて、市町村所在地点が都市光分布内に捕捉されているかを検証するためには、都市光とする光の強さの下限値を設定する必要がある。ここでは、2つの都市光分布モデルの形状が、都市の分布を反映しているかを比較するため、RCCLにおいて都市光が観測されている領域と、測定論モデルにおいて都市光が観測されたとする領域が同じ面積になるように、測定論モデルにおいて都市光とする光の強さの下限値を設定した。図4-7から、RCCLでは、日本の陸域にかかる全3次メッシュのうち約43%で都市光が観測されていることが分かった。そこで、測定論モデルにおいても、上位43パーセンタイル値に対応する光の強さを都市光とみなす光の強さの下限値とし、この値以上の光の強さを持つ3次メッシュ領域を都市光が観測された地域とした。図4-8、図4-9は、測定論モデルとRCCLについて、近畿・中部地方の陸域にかかる1kmメッシュにおける都市光強さの分布と市町村所在地点との関係を示したものである。図4-8ならびに図4-9中においては、比較のため、測定論モデル、RCCLともに、都市光強さをパーセンタイル値で表示した。図4-8ならびに図4-9に示されるように、測定論モデル、RCCLともおおそ市町村所在地点を捕捉できていることが見受けられる。

表4-2は、日本全国について、測定論モデルおよびRCCLにおいて捕捉された、あるいは捕捉されなかった市町村所在地点数の関係を示したものである。測定論モデルおよびRCCLで捕捉できた市町村所在地点は、それぞれ全3255点中の82.9%および79.4%となり、測定論モデルの方が3.5%多く、市町村所在地点を捕捉できていることが明らかになった。表4-3は、市町村所在地点の捕捉の成否に地域差があるかを検証するため、北海道、東北、関東、中部、近畿、中国・四国、九州、沖縄の8つの地方毎に、測定論モデルおよびRCCLの市町村所在地点の捕捉率を示したものである。北海道ではRCCLの捕捉率の方が3.8%高いものの、他の7つの地方では、全て測定論モデルの捕捉率の方が0.5%~8.9%多かった。このことから、測定論モデルの都市光分布モデルの精度は、RCCLと同等あるいはそれ以上であることが明らかになった。

図4-10は、各市町村・区の人口規模と測定論モデルおよびRCCLによる捕捉率の関係を表したものである。2,000~3,000人規模の町村を除く、ほとんどの人口規模の市町村・区において測定論モデルの捕捉率が、RCCLのそれを上回った。また、測定論モデルが、1万人以上の人口を持つ市町村・区であれば、90%以上捕捉できていることが明らかになった。図4-10には、市町村・区の人口規模と累積人口構成比の関係もあわせて示したが、1万人以上の人口を持つ市町村・区の総人口は、日本の全人口の93%以上を占めている。このことから、測定論モデルは、十分な都市捕捉能力を持っているといえる。

測定論モデルは、米軍にゲインの操作を依頼することなく、通常の観測の中で得られる画像をもとに、1万人以上の人口規模の都市を捕捉可能な都市光分布モデルを作成することを可能

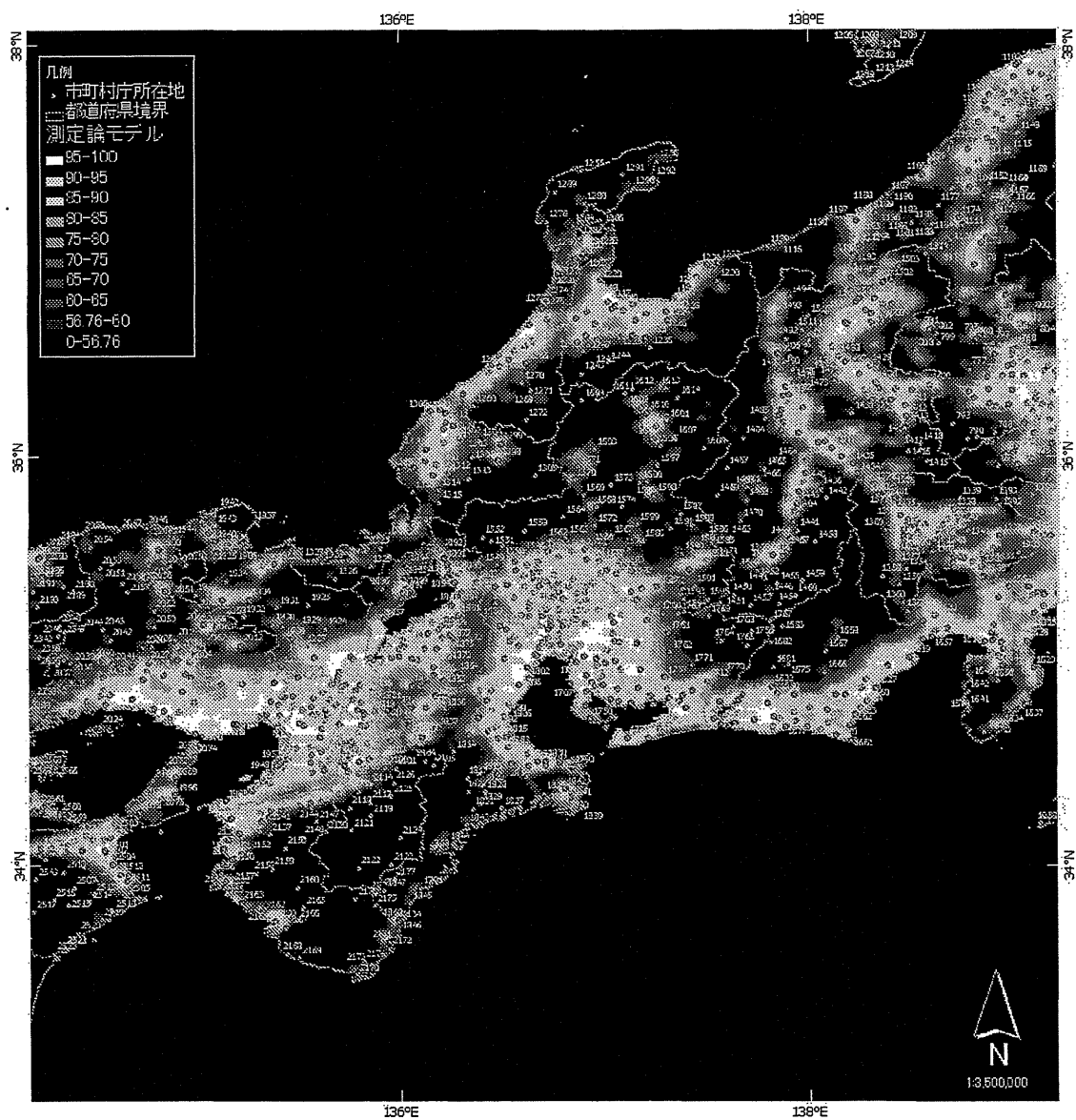


図 3-8 測定論モデルにもとづく近畿・中部地方(長野県, 岐阜県, 富山県, 石川県, 福井県, 静岡県, 愛知県, 三重県, 滋賀県, 京都府, 大阪府, 兵庫県, 奈良県, 和歌山県)における都市光分布と市町村所在地点との関係(都市光の強さはパーセンタイルであらわされており, 最大値は 100 パーセンタイル, 最小値が 0 パーセンタイルに対応する。)

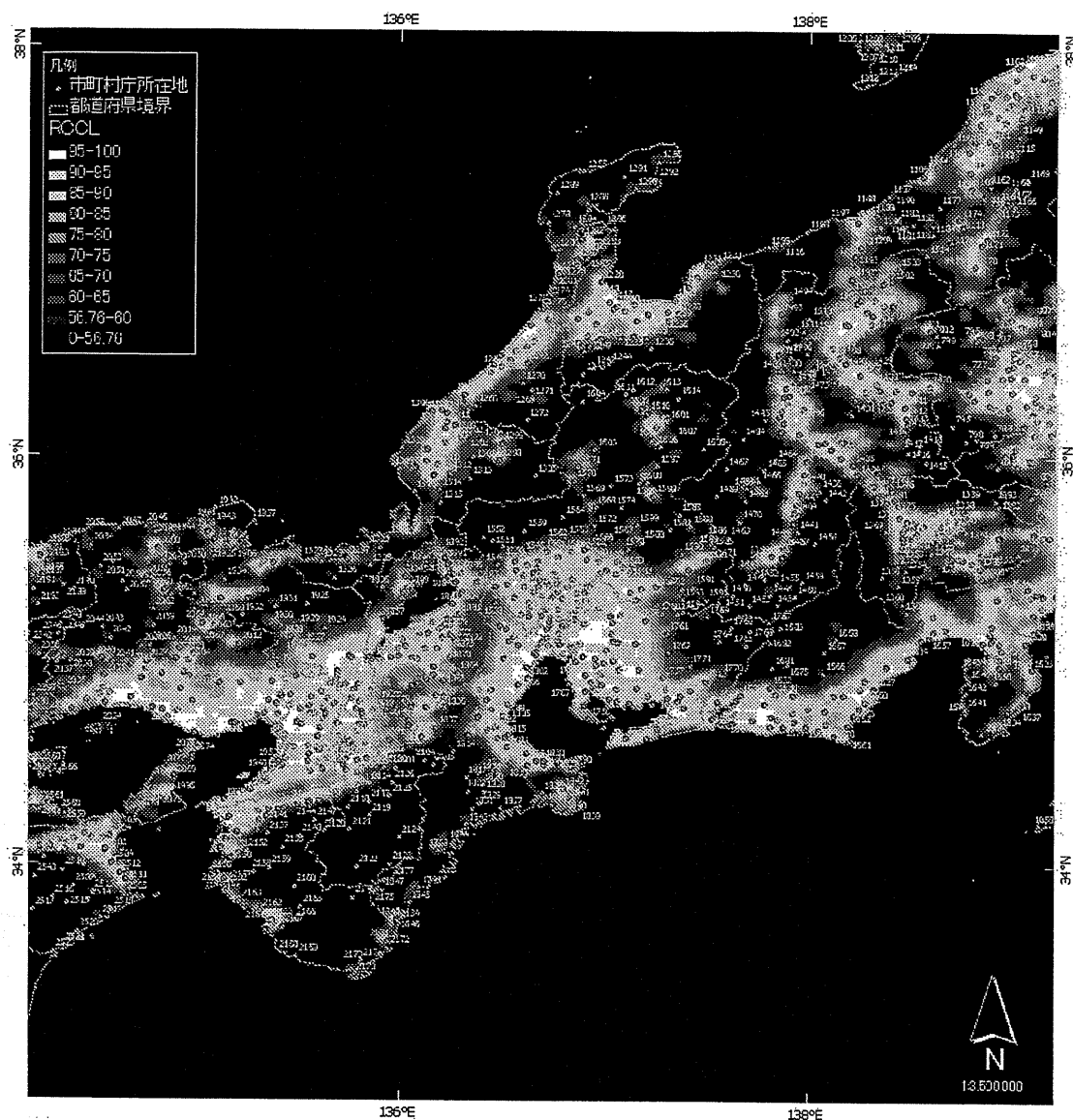


図 3-9 Radiance Calibrated City Light にもとづく近畿・中部地方(長野県, 岐阜県, 富山県, 石川県, 福井県, 静岡県, 愛知県, 三重県, 滋賀県, 京都府, 大阪府, 兵庫県, 奈良県, 和歌山県)における都市光分布と市町村所在地点との関係(都市光の強さはパーセンタイルであらわされており, 最大値は 100 パーセンタイル, 最小値が 0 パーセンタイルに対応する。)

表4-3 測定論モデルおよびRCCLで捕捉できた市町村所在地点の比較

		RCCL		
		捕捉された都市	捕捉されなかった都市	合計
測定論 モデル	捕捉された都市	2535 (76.8)	209 (6.3)	2744 (83.2)
	捕捉されなかった都市	94 (2.8)	461 (14)	555 (16.8)
	合計	2629 (79.7)	670 (20.3)	3299 (100)

表4-4測定論モデルおよびRCCLで捕捉できた市町村所在地点の地方毎の比較

			RCCL		
			捕捉された都市	捕捉されなかった都市	合計
測定論 モデル	北海道	捕捉された都市	193 (90.6)	5 (2.3)	198 (93)
		捕捉されなかった都市	13 (6.1)	2 (9)	15 (7)
		合計	206 (96.7)	7 (3.3)	213 (100)
	東北	捕捉された都市	419 (80.7)	35 (6.7)	454 (87.5)
		捕捉されなかった都市	16 (3.1)	49 (9.4)	65 (12.5)
		合計	435 (83.8)	84 (16.2)	519 (100)
	関東	捕捉された都市	518 (94.5)	9 (1.6)	527 (96.2)
		捕捉されなかった都市	6 (1.1)	15 (2.7)	21 (3.8)
		合計	524 (95.6)	24 (4.4)	548 (100)
	中部	捕捉された都市	463 (81.4)	30 (5.3)	493 (86.6)
		捕捉されなかった都市	21 (3.7)	55 (9.7)	76 (13.4)
		合計	484 (85.1)	85 (14.9)	569 (100)
	近畿	捕捉された都市	261 (79.3)	32 (9.7)	293 (89.1)
		捕捉されなかった都市	3 (9)	33 (10)	36 (10.9)
		合計	264 (80.2)	65 (19.8)	329 (100)
	中国・ 四国	捕捉された都市	288 (53)	60 (11)	348 (64.1)
		捕捉されなかった都市	17 (3.1)	178 (32.8)	195 (35.9)
		合計	305 (56.2)	238 (43.8)	543 (100)
	九州	捕捉された都市	358 (68.3)	35 (6.7)	393 (75)
		捕捉されなかった都市	17 (3.2)	114 (21.8)	131 (25)
		合計	375 (71.6)	149 (28.4)	524 (100)
	沖縄	捕捉された都市	35 (64.8)	3 (5.6)	38 (70.4)
		捕捉されなかった都市	1 (1.9)	15 (27.8)	16 (29.6)
		合計	36 (66.7)	18 (33.3)	54 (100)

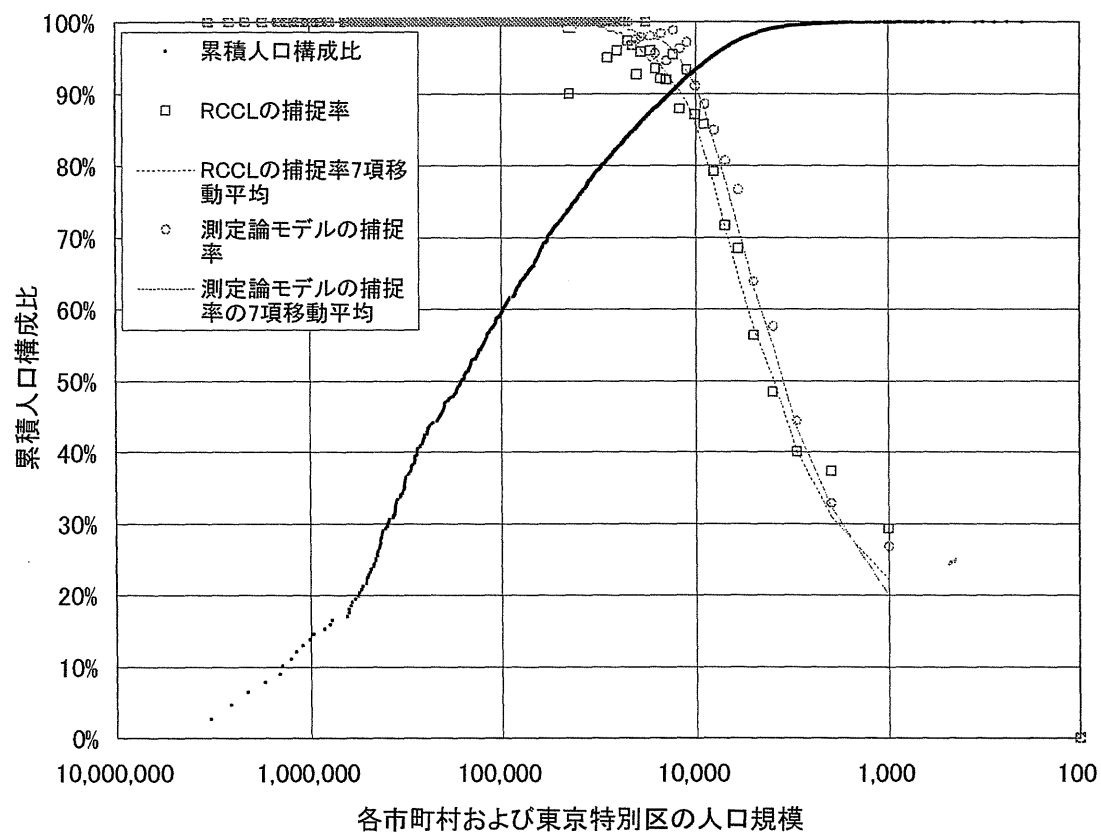


図4-10 各市町村・区の人口規模と測定論モデルおよびRCCLによる捕捉率の関係

にしている。5.では、測定論モデルを用いた都市圏の同定手法と人口・建物棟数推定手法を提案するが、測定論モデルの都市光分布モデルとしての信頼性が確かめられたことで、RCCLでは困難であった継続的な最新の都市圏分布、人口・建物棟数分布の把握が可能になった。

5. 測定論モデルを用いた都市圏の同定と人口・建物棟数の推定手法

4.では、米国の軍事気象衛星 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) が日々捉える地表面夜間可視画像の重ね合わせにより都市光をバイアスの入らない形で抽出する手法を提案した。しかし、測定論モデルは、夜間に観測される光源のうち安定して観測される光源の強さを推定するため、大きさの違いはあるものの、開発の及んでいない山間部であってもある一定の光の強さを持つことになる。その意味では、厳密に都市部が放つ光だけを捕捉するものではない。また、一般に衛星には寿命があり、必ずしも1つのプラットフォームが永続的に観測を続けられるわけではない。例えば、F12 は昼夜間の観測から、朝方・夕方の観測にずれつつあるといわれている。よって、複数のプラットフォームのリレーによって観測任務を維持する必要がある。この時、個々のプラットフォームが持つ観測画像データの癖の補正が問題となる。この補正は、DMSP 画像を用いた都市光分布のモニタリングを実用的なものにする上で不可欠である。

南海トラフを震源とする地震に対する被害想定において、自治体の間でその内容が大きく異なっていることと、行政界を越えた統一的なシナリオに従った広域被害想定的重要性が指摘されている。災害が行政界を越えて発生するということは、単に、地震外力が行政界と無関係に発生することだけでなく、人間の営みも行政界を越えて、いわば「都市圏」のような、ある連続的な空間的広がりを単位として成立していることにも起因する。同一都市圏内における人間の営みはある種の運命共同体にあると考えれば、防災計画も、そのような空間単位を意識したものにするべきである。よって、人間の営みの空間的単位である都市圏を同定し、その都市圏の変化を把握することは、広域災害に対する防災計画の対象範囲の同定に資することになる。

都市光分布モデルと人口、GDP、エネルギー消費量との関係を分析した研究としては、Welch(1980)、中山・他(1993)、Elvidge et al.(1997)、Sutton et al.(1997)、Sutton(1997)、Konami et al.(1998)、Elvidge et al.(1999)、Dobson et al.(2000)、Sutton et al.(2001)が挙げられる。また、同様に都市光分布モデルを用いた都市圏の同定に関する研究としては、Imhoff et al.(1997)、Imhoff et al.(1997)が挙げられる。これらの研究においては、都市光分布モデルとして、ある一時点における観測画像や、3.2.2~3.2.4.でふれた DMSP 全球夜間画像、Stable Light、RCCL を用いている。4.でも述べたように、これらの都市光分布モデルでは、安定した都市光分布を継続的に把握することが難しい。よって、測定論モデルを用いた都市圏の同定手法や、人口や地震被害想定に必要な建物棟数の推定式を提案する必要がある。

そこで、本章では、測定論モデルと人口分布の関係から、3次メッシュ単位での都市圏の同定手法の提案と都市圏を意識した人口推定手法の提案および検証を行う。加えて、地震被害想定の中かで不可欠の項目である建物被害の推定に必要な、建物棟数の推定手法の提案および検証を行う。さらに、モニタリングの継続可能性確保のための、異なるプラットフォーム間の画像補正手法を提案するとともに、都市圏の時間変化を検証する。

5.1. 測定論モデルを用いた都市圏の同定と人口推定

都市圏とはある都市を中心として種々の都市機能が周辺地域に影響を及ぼしている範囲を呼ぶ。日本では、国勢調査において、広域的な都市地域を規定するため、行政区域を越えて設定

された統計上の地域区分として、中心都市の人口の大きさ、周辺都市の中心都市への接続性および通勤・通学者の割合を基準に、大都市圏・都市圏を設定している。米国では、中心都市の人口、周辺都市の人口および非農業労働者率と中心市への接続性を基準に、大都市統計地域 (Metropolitan Statistical Area; M.S.A) を設定している。そこで、本研究でも、人口規模と接続性を基準に都市圏と考えることにした。人口データとしては、平成7年国勢調査のメッシュ統計を用いた。また人口データと時期が対応する1995年の日本周辺の測定論モデルを作成した。

都市圏を規定する人口規模は、分析者の視点による。少しでも開発の手が及んでいる地域をも都市圏としたい場合には、都市圏を規定する人口規模の水準は低くなると考えられる。また、大都市の中心市街地のみを都市圏と考える場合には、人口規模の水準は高くなると考えられる。そこで、都市圏を規定するメッシュ内人口を様々な水準に定め、各人口規模水準に対応する都市光強さを求めた。メッシュ内人口の水準 N としては、1人、10人、50人、100人、500人、1,000人、5,000人、1万人、5万人を選んだ。図5-1は、 DN と、ある DN を持つ全メッシュ数に対する、メッシュ人口が水準 N 以上であるメッシュ数の割合 r_N の関係を示したものである。 N が100人以上5万人未満の r_N については、 $DN < 222$ では、 DN が大きくなるにつれ増加し、 $DN = 222$ でピークを迎え、 $DN \geq 223$ では減少する傾向があることがわかった。これは、大都市の中心部においては、都市光が強くなる一方、夜間人口は減少するためと考えられる。よって、 $DN = 223$ は、都市圏を規定する一つの基準となりうる。各メッシュ人口水準の都市圏を判別する都市光強さは、閾値の考え方に従い、式4-1を用いて求めた。

$$DN_{tbN} = \min\{DN\} \quad [4-1]$$

ただし DN は、 $r_N(DN) \geq 0.5$ 、 $DN \leq 222$ を満たす。

ここで、 DN : 測定論モデルにおける都市光強さ、

DN_{tbN} : メッシュ人口水準 N の都市圏を規定する DN の閾値

$r_N(DN)$: ある DN を持つ全メッシュ数に対する、メッシュ人口が N 以上であるメッシュ数の割合

各メッシュ人口水準の都市圏を判別する DN の閾値を表5-1に示す。各閾値および $DN = 222$ によって規定される9つの都市圏をそれぞれ、レベル1～レベル9都市圏と呼ぶことにする。各レベルの都市圏を示したものが、図5-2.a,b.である。レベル1都市圏は、東京特別区、大阪市、名古屋市のごく中心部に相当している。レベル3都市圏になると、先の3都市に加え、広島市、福岡市の中心部が現れる。レベル4都市圏になると、残りの政令指定都市を始めとして、日本各地の地域的な中心都市が現れる。また、いわゆる3大都市圏が形成される。レベル5都市圏になると、レベル4までに現れた各都市圏同士の統合が見られ、レベルが上がるにつれ、さらに小さな地方都市の出現と大都市圏への統合が進む。レベル7都市圏で、いわゆる3大都市圏が一つの都市圏に統合される。レベル8、レベル9都市圏はその空間分布および形状にほとんど差がない。このレベルでは、いわゆる北関東から福岡までの、太平洋ベルト地帯をも包含する巨大な都市圏が出現している。

各レベルの都市圏を判別する DN の閾値を用いることで、人口の推定も可能となる。各レベルの都市圏境界に挟まれた領域におけるメッシュ人口の中央値を表5-2に示す。表5-2は、 DN とメッシュ人口との関係を、都市圏を考慮した形で、単純化しているため、これを用いることで、ある DN 値をもつメッシュにおける人口の概数を求めることができる。

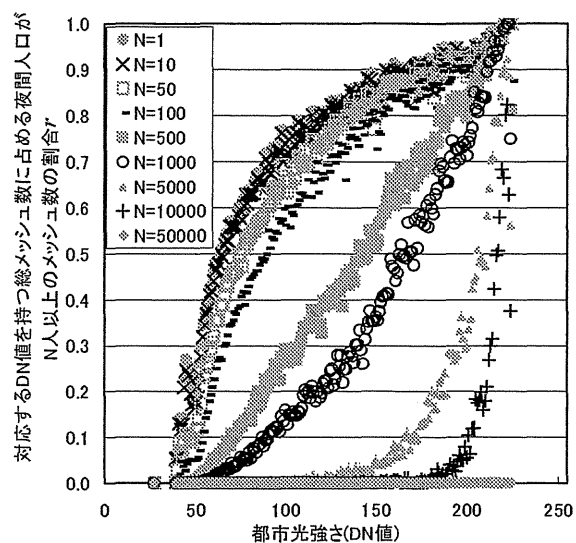


図5-1 測定論モデルにおいてある都市光強さDNを持つメッシュの総数に対する、居住人口がN人を超えるメッシュ数の割合

表5-1 メッシュ人口水準(N)とDNの閾値の関係

都市圏レベル	メッシュ人口水準(N)	DNの閾値
1	—	223
2	10000以上	217
3	5000以上	211
4	1000以上	172
5	500以上	146
6	100以上	89
7	50以上	77
8	10以上	66
9	1以上	64

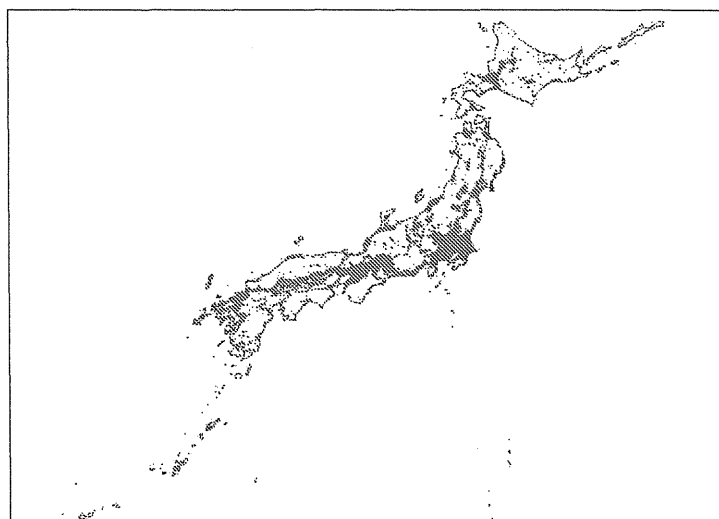


図5-2a Level 9都市圏の空間分布

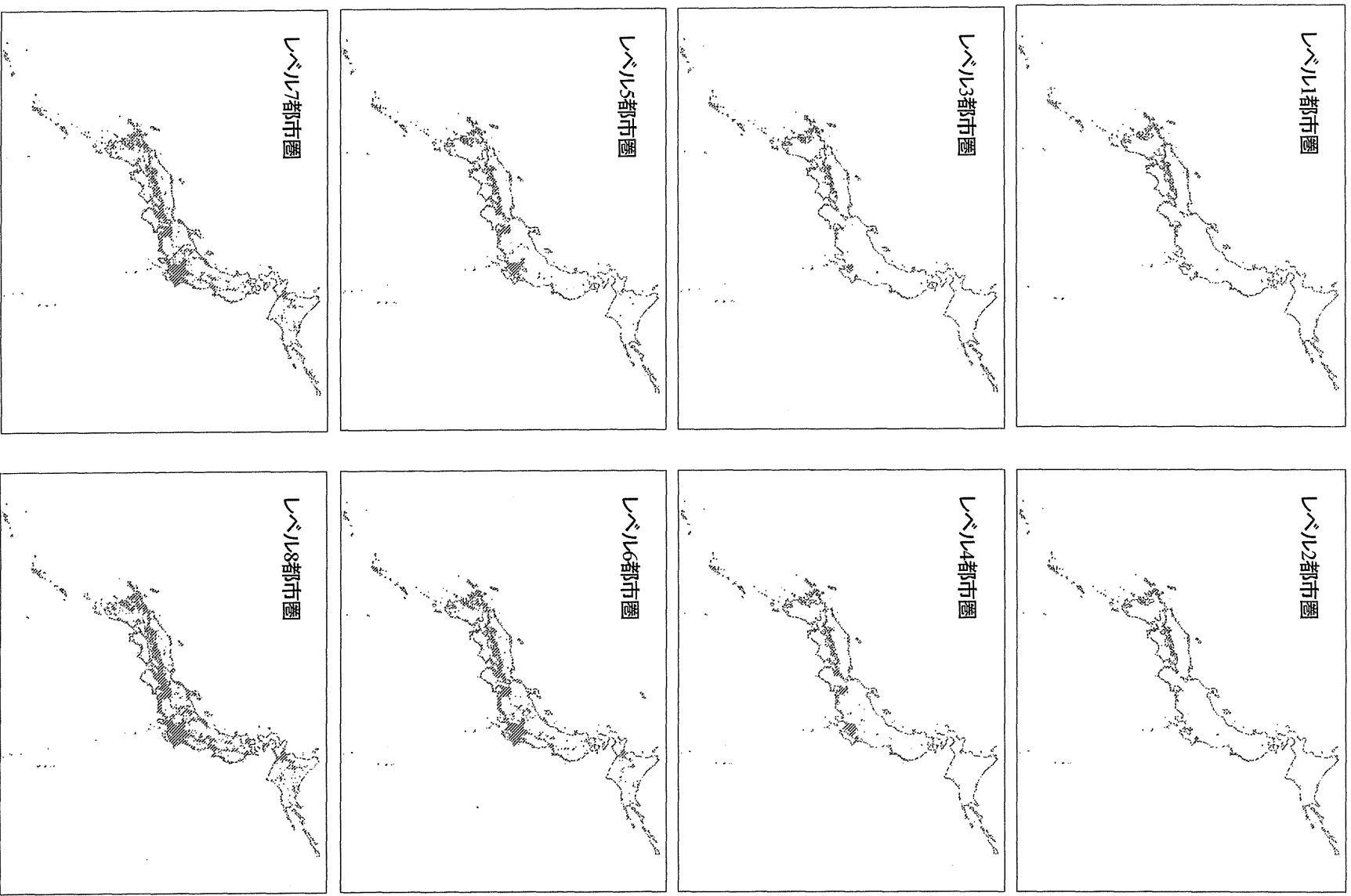


図5-2b レベル1～8の都市圏の空間分布

表5-2隣接するレベルの都市圏境界に挟まれた領域における3次メッシュ人口の中央値

領域	DNの範囲	人口の中央値
レベル1境界内	$223 \leq \text{DN}$	11372
レベル2境界-レベル1境界	$217 \leq \text{DN} < 223$	12427
レベル3境界-レベル2境界	$211 \leq \text{DN} < 217$	7782
レベル4境界-レベル3境界	$172 \leq \text{DN} < 211$	2372
レベル5境界-レベル4境界	$146 \leq \text{DN} < 172$	767
レベル6境界-レベル5境界	$89 \leq \text{DN} < 146$	241
レベル7境界-レベル6境界	$77 \leq \text{DN} < 89$	74
レベル8境界-レベル7境界	$66 \leq \text{DN} < 77$	29
レベル9境界-レベル8境界	$64 \leq \text{DN} < 66$	7

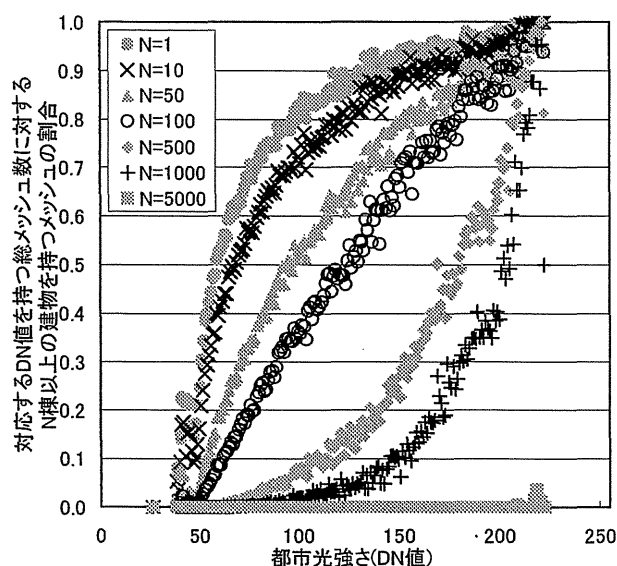


図5-3 測定論モデルにおいてある都市光強さDNを持つメッシュの総数に対する建物棟数がN棟を超えるメッシュ数の割合

表5-3 3次メッシュ単位の総建物棟数とDNの閾値の関係

総建物棟数	DNの閾値
-	222
1000	206
500	182
100	128
50	98
10	69
1	59

5.2 測定論モデルを用いた建物棟数推定

損害保険料率算定会(1996)によれば、地震被害想定を行いその結果を公表している 37 都道府県・8 政令指定都市中、建物被害棟数を想定していない自治体は存在しない。したがって、建物棟数推定の需要は非常に高いといえる。一方で、現存する建物棟数を、国勢調査や事業所統計のように、3 次メッシュ単位で把握し、公表している統計は存在しない。建物関連の統計としては、住宅・土地統計が存在するが、標本調査であり、市区単位でしか公表されていない。また住宅以外の建物は含まれていない。その他の建物の情報としては自治体が管理している家屋課税台帳あるいは建物登記簿があるが、広域に渡る想定地域全域に関して、これらのデータを入手し、被害想定分析単位に組み替えることは、極めて難しい。このような現状に対し、長谷川・翠川(1997,1999)は、国勢調査と事業所統計の 3 次メッシュ統計を用いて、構造別・年代別建物棟数を推定する手法を提案した。長谷川・翠川の手法は、入手の難しい建物棟数データを、既存の統計を用いて、3 次メッシュ単位で整備できる。しかし、3 次メッシュ統計の更新頻度は、5 年に一度であるため、現状の把握に弱い。そこで、本研究では都市圏の同定と同様の方法で、測定論モデルから建物棟数を推定する手法を提案する。建物棟数データとしては、長谷川・翠川(1997,1999)の手法に基づいて平成 7 年国勢調査と、平成 8 年事業所統計の 3 次メッシュ統計から推計された木造・非木造別建物棟数を用いた。ここで推計された建物棟数は 1995 年および 1996 年のデータをもとに推計されたものであるため、この両年を通じた平均的な建物棟数をあらわすものと考えられる。都市光分布と建物棟数分布の関係を分析する際に、同じ時期の値を比較するため、1995 年および 1996 年の 2 年間の夜間可視画像を用いた測定論モデルを作成した。

図 5-3 は、測定論モデルにおいてある都市光強さ DN を持つメッシュの総数に対する、建物棟数が N 棟を越えるメッシュ数の割合 r_N を示したものである。 N としては、1 棟、10 棟、50 棟、100 棟、500 棟、1,000 棟、5,000 棟を選んだ。 N が 50 以上 5,000 未満の r_N については、DN の増加に対し、 r_N が DN=221 をピークとして、増加から減少に転じる傾向がみられた。そこで、ここでも、DN=222 および式[1]で規定される DN を 3 次メッシュ単位の総建物棟数規模を判別する閾値とする。各 N に対応する閾値を表 5-3 に示す。

表 5-3 に示した閾値を用いることで、建物棟数の推定も可能となる。各 N に対応する閾値で区分される DN 値の範囲毎の、総建物棟数分布の中央値および、総建物棟数に占める非木造建物棟数の割合を表 5-4 に示す。DN 値が上昇するにつれ、総建物棟数と、総建物棟数に占める非木造建物棟数の割合が増加している。表 5-4 の中央値によって、各 DN 値範囲の建物棟数を推定し、木造・非木造建物棟数の比率を用いることで、メッシュ単位で木造・非木造別の建物棟数の概数を求めることができる。

5.3 継続的なモニタリングに向けたプラットフォーム間の補正

都市光の測定論モデルを用いた被害ポテンシャル推定手法は、ある時点のあるプラットフォームによって観測された画像から作成された測定論モデルと、同時点における実測データとの関係に基づいている。観測任務が新しいプラットフォームに引き継がれた場合には、新旧のプラ

表5-4 隣接するDNの閾値の範囲における3次メッシュ単位の総建物棟数

DNの範囲	総建物棟数の 中央値	総建物棟数に占める 非木造建物棟数の割合
$222 \leq \text{DN}$	997	0.41
$206 \leq \text{DN} < 222$	1640	0.14
$182 \leq \text{DN} < 206$	733	0.10
$128 \leq \text{DN} < 182$	207	0.09
$98 \leq \text{DN} < 128$	73	0.10
$69 \leq \text{DN} < 98$	24	0.11
$59 \leq \text{DN} < 69$	4	0.12

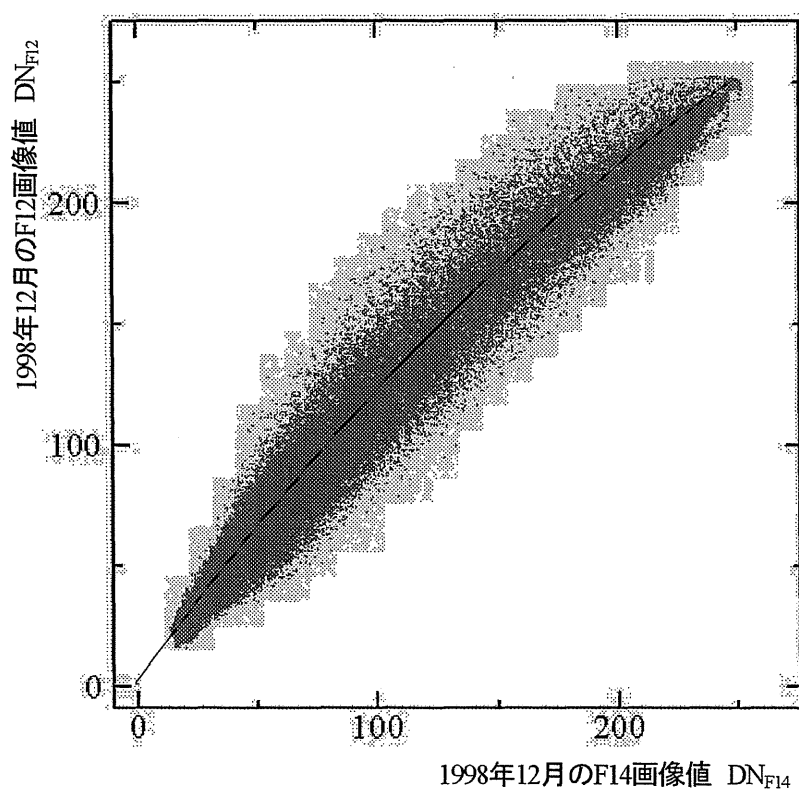


図5-4 1998年12月のF12画像値DN_{F12}とF14画像値 DN_{F14}の関係

ットフォームから観測される画像の違いを考慮して、新しいプラットフォームの観測画像から得られる測定論モデルを補正する必要がある。

1998 年の 11 月 23 日から 12 月 22 日の間に、F12 および F14 によって観測された日本周辺の画像をもとに、測定論モデルの日本の陸域内の 3 次メッシュにかかるピクセル間を比較した。図 5-4 に 1998 年 12 月の F12 画像値 DN_{F12} と F14 画像値 DN_{F14} の関係を示す。図 5-4 より、結果、F14 が観測する画像よりも、F12 が観測する画像の方が、全体的に明るいことがわかる。両者から観測される画像の違いの要因として、観測時刻に依存する都市光強度の違いも考えられる。しかし、F12、F14 の夜間観測における赤道通過時間は、それぞれ現地時間の 20:49 および 20:35 となっており、その時間差は、15 分未満である。このことから両者の観測画像の違いに占める観測時間差による影響は小さいものと考えられる。

両者の関係が、2 次関数で表現できると仮定し、最小二乗法により係数を求めた。その結果、両者の関係は、式 4-2 で表現できる事が明らかになった。

$$DN_{F12} = -0.0013 \cdot DN_{F14}^2 + 1.3145 \cdot DN_{F14} + 0.8198 \quad (r^2 = .978) \quad [4-2]$$

ここで、 DN_{F12} : F12 から観測された画像の DN 値

DN_{F14} : F14 から観測された画像の DN 値

図 5-4 中の曲線は、得られた回帰式を示す。式[4-2]を用いることにより、F14 から観測された画像に基づく測定論モデルを、F12 から観測された画像並に補正することが可能となる。このように、新しいプラットフォームが導入される度に、同期間の観測画像を用いて、補正式を導くことで、プラットフォームが変わっても、被害ポテンシャルのモニタリングが可能となる。

5.4. 1995 年と 2000 年の測定論モデルにおける都市圏の比較

4.3.で提案した手法を用いることで、1995 年と 2000 年の測定論モデルの比較が可能となった。図 5-5 は、1995 年と 2000 年における、メッシュ人口水準 $N=1, 10, 100, 1,000, 10,000$ に対応するレベル 3, 5, 7, 8, 9 都市圏を比較したものである。また、図 5-6、表 5-5 は 1995 年及び 2000 年における各レベルの都市圏の数を比較したものである。図 5-6 より、この 5 年間で、レベル 1 ~3 都市圏クラスター数は増加した一方で、レベル 6~9 の都市圏クラスター数は減少したことがわかった。また、レベル 4, 5 都市圏のクラスター数はほぼ安定していたことが明らかになった。

図 5-7 は、全国の市町村および東京特別区庁舎所在地が 2000 年において属していた都市圏と 1995 年~2000 年の 5 年間ににおける各市町村・区の人口増減の関係を整理したものである。レベル 5 以上の都市圏に属する市町村・区では、人口が増加した市町村・区の数、減少した市町村・区の数を上回っている。一方、レベル 6 以下の都市圏に属する市町村・区では、人口が減少した市町村・区の数、増加した市町村・区の数を上回っている。日本全国の人口は増加していることから、日本全体として、レベル 6~9 都市圏に属する市町村・区から、レベル 1~5 都市圏に属する市町村・区に人口が移動していることがわかる。図 5-7 が示す結果は、図 5-6、表 5-5 が示す、各都市圏レベルごとのクラスター数の変化と一致している。よって、測定論モデルにもとづき同定される都市圏は、この 5 年間ににおける、小規模な都市圏の統合・消滅、大規模都市圏

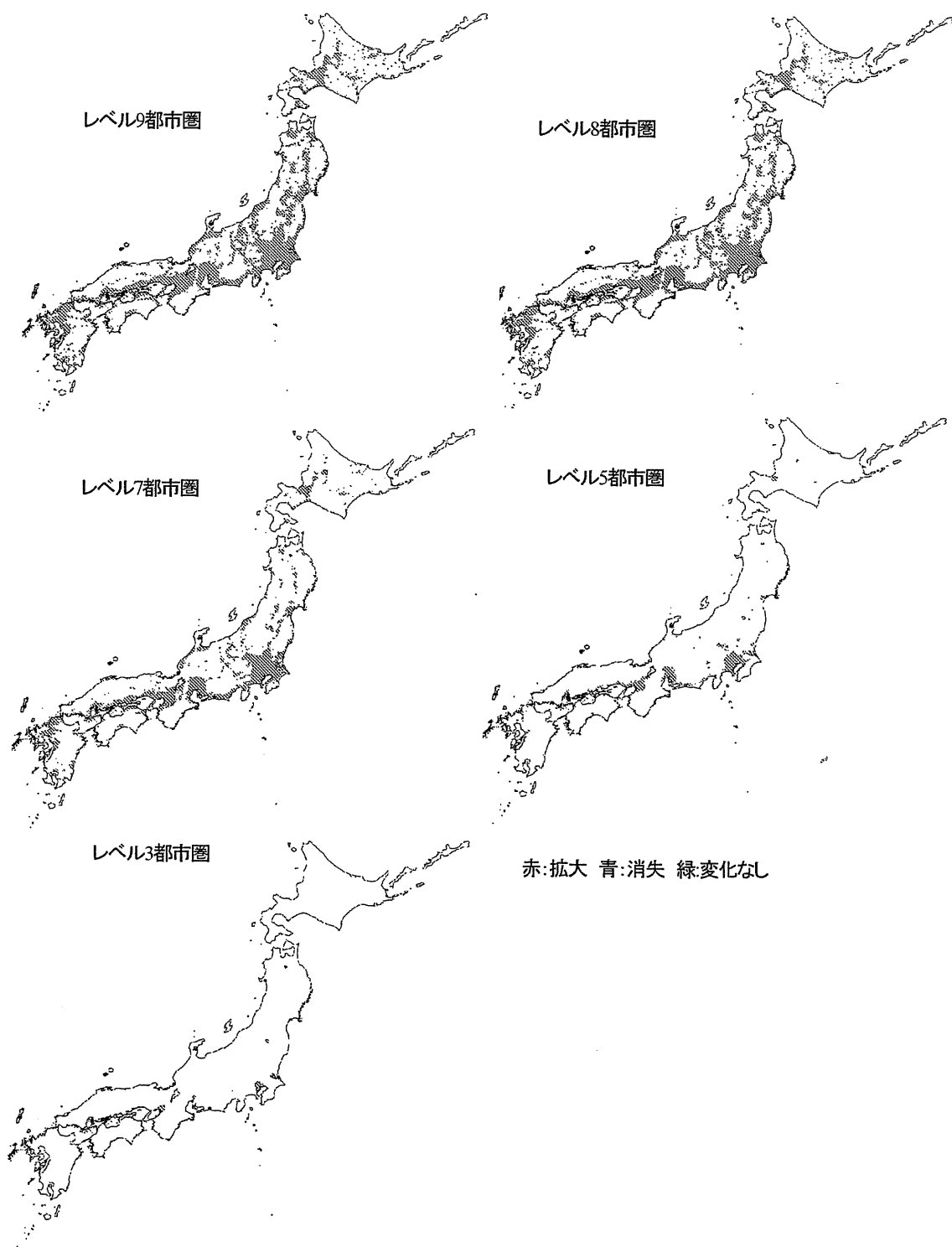


図5-5 レベル9, 8, 7, 5, 3の都市圏の空間分布変化(1995-2000)

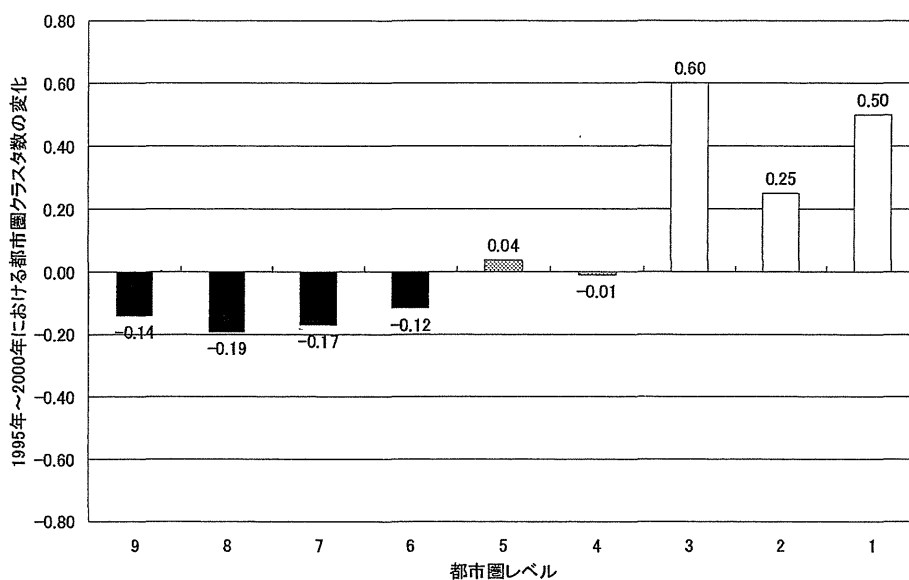


図5-6 1995年～2000年における都市圏クラスター数の増減率

表5-5 1995年～2000年における都市圏クラスター数の増減

都市圏レベル	1995年	2000年	増減数	増減率
1	2	3	1	0.50
2	4	5	1	0.25
3	5	8	3	0.60
4	81	80	-1	-0.01
5	135	140	5	0.04
6	369	325	-44	-0.12
7	455	377	-78	-0.17
8	520	419	-101	-0.19
9	500	429	-71	-0.14

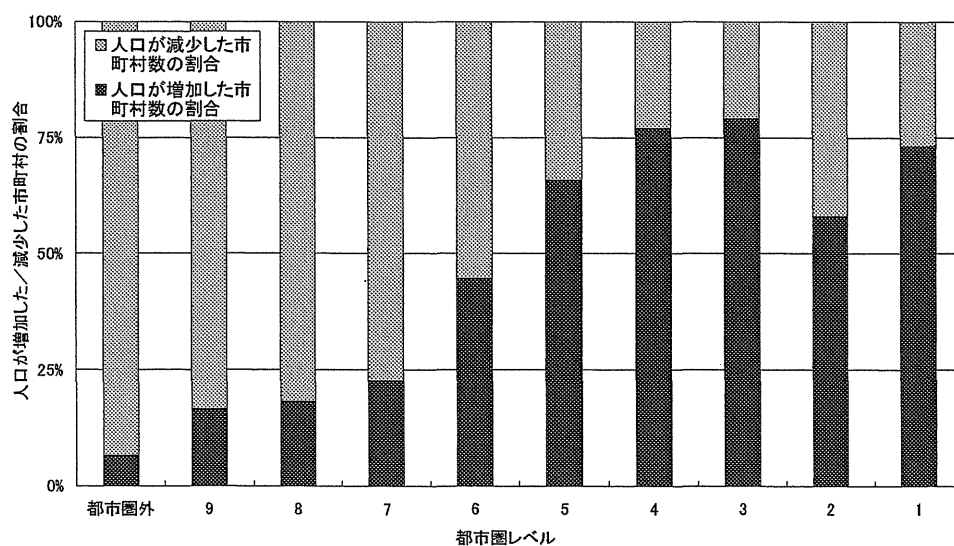


図5-7 1995年～2000年における都市圏クラスター数の増減率

の拡大・増加を反映しているといえる。

また、1995年と2000年の都市圏の比較から、全国的に見て、レベル5都市圏が統合・消滅する都市圏と、拡大・増加する都市圏を分ける境界であることが明らかになった。これは、少なくとも現時点においては、日本の都市機能がレベル5都市圏で規定される領域に収斂していく傾向にあることを示している。よって、次の南海トラフを震源とする地震への対策においても、レベル5都市圏をいかに守るかが重要になると考えられる。

5.5. 測定論モデルを用いた人口・建物棟数推定手法の検証

5.5.1. 人口推定手法の検証

2000年の測定論モデルをもとに推定された3次メッシュ人口を市町村単位に再集計し、同時期に行われた平成12年国勢調査結果の市町村集計と比較することにより、4.2において提案した人口推定手法の検証を行った。市町村境界にかかる3次メッシュにおける推定人口は、当該3次メッシュ内の各市町村の面積の比率に従って、各市町村に按分した。図5-8は市町村ごとの推定人口と、国勢調査結果の関係を示したものである。推定棟数と統計棟数の関係を原点を通る直線でモデル化すると、傾きは1.18 ($r^2=94$) となった。統計による市区町村人口が1万人程度より小さい場合には、推計人口は統計人口に比べてかなり過小となり、1万人から10万人では、15%過小評価の傾向がある。それ以上では両者はおおむね一致していることが分かる。以上のことから、本論文で提案する手法は、特に都市部の人口分布のモニタリングに力を発揮するといえる。

5.5.2. 建物棟数推定手法の検証

4でも述べたとおり、全国の3次メッシュ単位の建物棟数データの入手は難しいが、都道府県によっては、市区町村別の構造別家屋数を統計年鑑等を通じて公開していることがある。ここでは、兵庫県の市町別構造別家屋数を用いて、3.で示した手法の検証を行った。図5-9は、兵庫県内の市町毎の推定建物棟数と、統計による建物棟数の関係を示したものである。総建物棟数については、全般に推定値は過小評価の傾向にある。特に、市町村内の建物棟数が1万棟以下の場合、その傾向はかなり大きなものとなる。推定棟数と統計棟数の関係を原点を通る直線でモデル化すると、傾きは1.72 ($r^2=92$) となった。決定係数が比較的高いことから、市町内の建物棟数が1万棟以上である場合、推定値を1.72倍することによって、総建物棟数をある程度推定できる。木造建物棟数については、推定棟数と統計棟数の関係を原点を通る直線でモデル化すると、傾きは1.00 ($r^2=74$) となっており、市町内の建物棟数が1万棟以上である場合、推定棟数と統計棟数は比較的一致している。一方、市町内の建物棟数が1万棟未満の場合には、かなりの過小評価となってしまう。非木造建物棟数に関しては、全般的にかなりの過小評価の傾向がある。推定棟数と統計棟数の関係を原点を通る直線でモデル化すると、傾きは6.50 ($r^2=85$) となった。決定係数がある程度高いので、市町内の建物棟数が1万棟以上であれば、推定値を6.50倍することで、ある程度非木造建物棟数を推定すること可能である。しかし、80%もの過小評価がなぜ生じるのかについては今後検討が必要である。

以上から、建物棟数に関しては、市町内の建物棟数が1万棟以上である場合には、必要に応じて補正を行うことにより、ある程度の推定が可能であることがわかった。また、市町内の建物棟数が1万棟以下である場合には、かなりの過小評価となることがわかった。ただし、ここでの

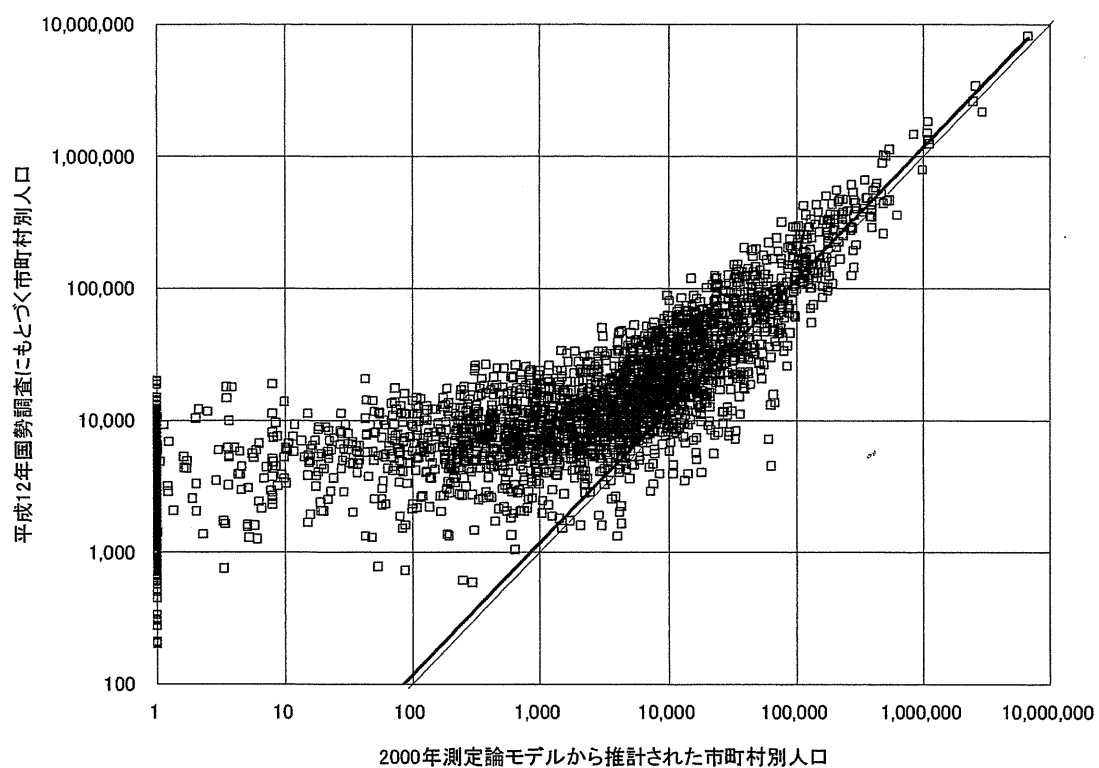


図5-8 2000年測定論モデルから推計された人口と平成12年国勢調査人口との市区町村別の比較

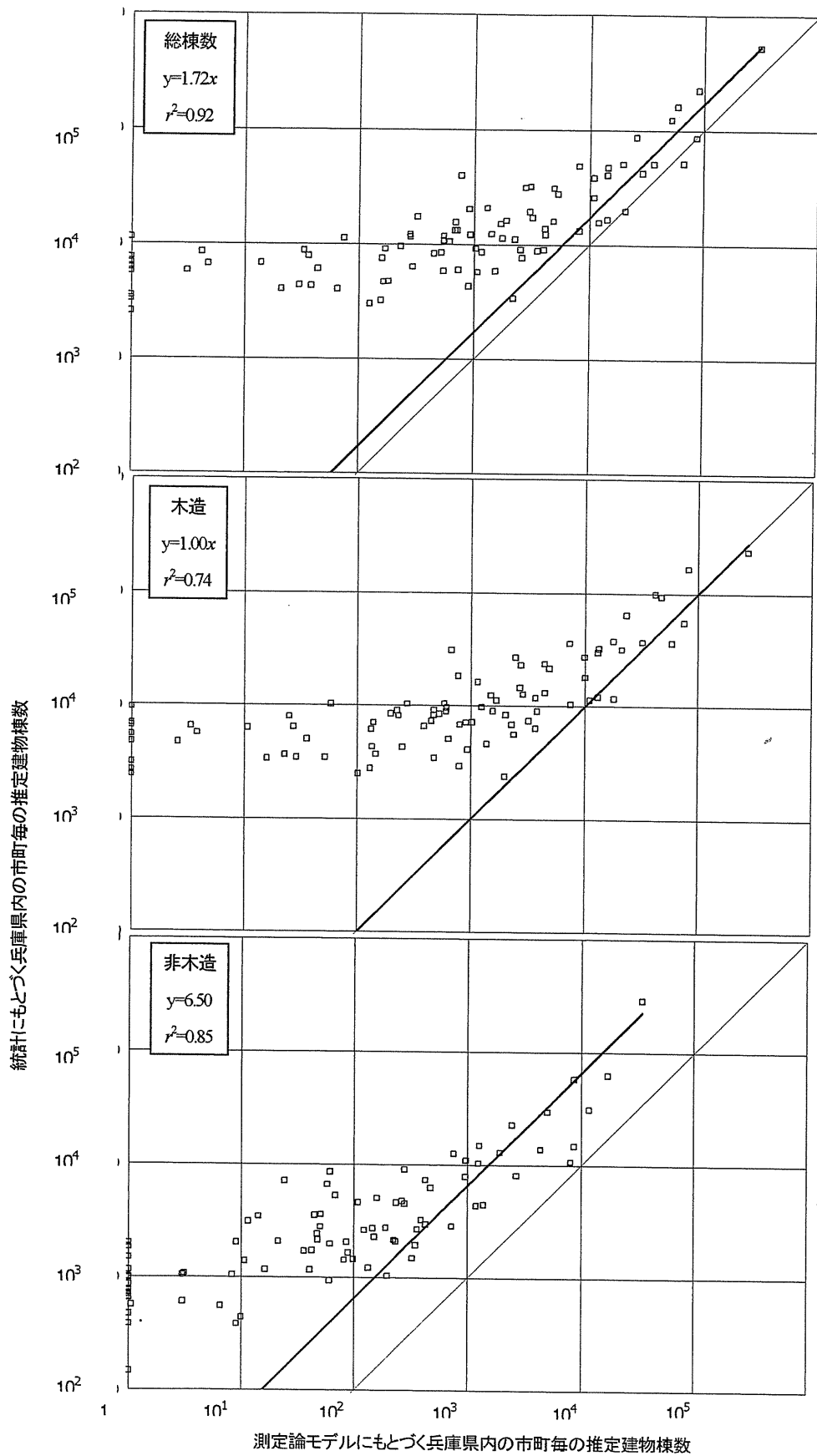


図5-9 兵庫県内の市町毎の推定建物棟数と統計による建物棟数の関係(総棟数, 木造建物棟数, 非木造建物棟数)

建物棟数推定手法の検証は、あくまで、兵庫県の統計に基づくものであり、今後、他都道府県における検証が必要である。

6. DMSP夜間可視画像における画素単位の観測値分布を考慮した都市光強度推定手法の改良

6.1. はじめに

現在実施されている開発途上国の防災力向上のための取り組みにおいては、当該国の自助努力だけでなく、国連などの国際機関が中心となった支援が大きな役割を担っていることが多い。そのような国際的な災害低減の努力が効果的なものになるためには、世界全体の災害リスクを見渡し、どの都市、地域から支援を進めていくべきかの戦略を合理的に構築する必要があり、グローバルな視点からのリスク評価が要求される。しかし、特に開発途上国においては、災害リスク評価に不可欠な人口・社会ストックの空間分布といった基礎データの入手は困難であり、リスク評価自体がままならないことが多い。

このような問題に対し、高島・林(2001,2002)は、それらリスク評価に必要な基礎データのモニタリング手法として、米国の軍事気象衛星 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)が日々捉える夜間可視画像を利用する手法を提案してきた。DMSP 夜間可視画像を用いた都市光抽出や、抽出された都市光分布と人口、GDP、電力消費量の分析に関しては、Welch(1980)、中山(1993)、Elvidge et al.(1997)、Konami et al.(1998)、Elvidge et al. (1999)、Nakayama and Elvidge (1999)、Dobson et al.(2000)らが行ってきている。中でも、Elvidge et al. (1999)では、都市光の飽和を避けるため通常の観測時とは異なる特別なゲイン設定を米空軍に依頼し、得られた画像を依頼したゲイン設定にもとづき補正して、Radiance Calibrated City Light (以下 RCCL) と呼ばれる都市光強度の絶対値の分布を作成している。しかし、RCCL の作成においては、手作業で雲やノイズの除去を行い、通常の観測時とは異なる特殊なゲイン設定の下で得られた画像を用いているため、通常の観測において日々得られる画像データを利用できない、作成に時間がかかるといった問題があった。そこで、高島・林(2001)は、測定論にもとづき、通常の観測で得られる大量の観測画像の平均値をとることで、通常観測時におけるゲインの周期的変動や、雲やノイズの影響を除去し、短時間で都市光強度の相対値の分布を抽出する手法と、その手法により得られる都市光分布を用いて、人口・建物棟数を3次メッシュ単位で推定する手法を提案した。DMSP 夜間可視画像は、毎日地球上の任意の地点の画像を得られるという長所を持つが、1つ1つの画像は、雲、ノイズ、センサへの太陽光の入射等の影響を強く受けており、少数の画像から確度の高い都市光強度分布を得ることは極めて困難である。高島・林(2001)の提案は、そのような画像に対して、特別なゲイン設定を行わずとも、また手動によるクリーニングを行わずとも、日々得られる大量の画像を活用することで、都市光分布を抽出することができ、それを人口・建物棟数の推定に利用できるという可能性を示したものである。しかし、高島・林(2001)の手法(以下「旧手法」)では、光の強度が強い地域において、人口を過小評価するという問題があった。これは、主に大都市域の光強度が可視領域センサの感知域の上限を超え飽和しているために、光の強度の違いの情報が失われていることに起因している。そこで、本論文では、特に大都市域内における都市光強度推定の精度の向上をめざし、ある期間における画素ごとのDN値の分布形状が、当該画素のDN値の中央値に対して、安定していることを利用して、飽和画素において可視領域センサの感知域の上限が無かった場合に実現していたであろう仮想の中央値を推定する手法を提案する。

加えて、旧手法によって得られた都市光分布および前出の RCCL との比較を行うため、RCCL の作成に使われた画像と同じ時期（1996 年）に観測された画像を用いて、旧手法および本研究で提案する手法（以下「新手法」）にもとづいた都市光画像を作成し、新手法にもとづく都市光分布が、旧手法によって得られた都市光分布と比べて、大都市域内の光の強度の違いをより鮮明に反映していることを示す。さらに、平成 7 年国勢調査メッシュ統計との比較により、新手法にもとづく都市光分布の方が、旧手法にもとづくものに比べ、大都市域内の人口推定に有利であることを示す。

6.2. 観測値分布を考慮した都市光強度推定手法

6.2.1. DMSP 夜間可視画像の特性

DMSP 衛星および夜間可視画像の特性全般については、Elvidge et al.(1997), Elvidge et al. (1999)において詳細に解説されているため、ここでは、特に DMSP 夜間可視画像の観測値に影響をおよぼすゲイン設定の特性について述べる。図 6-1 に示すように、DMSP 衛星の可視領域センサは、光の強度の違いを識別できるある所定の範囲（ゲイン）を持ち、そのゲイン内の光の強度に対して、1 から 63 の DN(Digital Number)を与えて記録する。ゲインを超えた強い光は 63 として、ゲインに満たない弱い光はすべて 1 として記録される^{補注(1)}。可視領域センサの本来の目的は、月光を反射する雲を捉えることである。月齢、月の高度の変化に伴い変化する月明かりの強さのもとで、一定した雲の像を得るため、月齢、月の高度変化に伴う周期的・自動的なゲイン調節が行われている。これにより、図 6-2 に示すように、仮に都市光が変化していなくとも、見かけ上都市光が変化するように見える。

6.2.2. ある期間における DMSP 夜間可視画像の観測値の分布

高島・林(2001)が示すように、DMSP 夜間可視画像に捉えられる観測値は、その画素における本来の光強度と、周期的なあるいは不規則な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分の和で表現されるものとする。また仮に、ゲインの幅が無限大で、観測値が飽和することがないものとする。この場合、ある期間の任意の画素における観測値は、その画素における代表的な DN 値の周りに分布するものと考えられる。この様子を図示したのが、図 6-3 である。次に、ある限られたゲインのもとでの観測値の分布について考察する。ゲインを超えた光強度に対しては、1 もしくは 63 が与えられるため、DN 値の分布は、ゲインの端で切断された形状となることが考えられる。この様子を図 4 に示す。このようなゲインの制約のため、主に大都市域の光強度が可視領域センサの感知域の上限を超え飽和している領域内で、光の強度の違いの情報が失われてしまうこととなる。

また、旧手法では、ある画素における代表的な DN 値として平均値を用いているが、DMSP 夜間可視画像のようにゲインの制約により DN 値の分布が切断されている場合には、ゲインの制約の元での DN 値の中心傾向すら適切に反映しない。たとえば、ある画素におけるある期間の DN 値の分布の中心がゲインの上限付近に見られる場合、平均値などのモーメント系の測度を採用する限りは、ゲイン内におさまった光強度の DN 値に引きずられ、DN 値の代表値は過小に評価されることとなる。このことも、旧手法にもとづく都市光分布で光強度の強い領域における情報が失われる要因となっている。

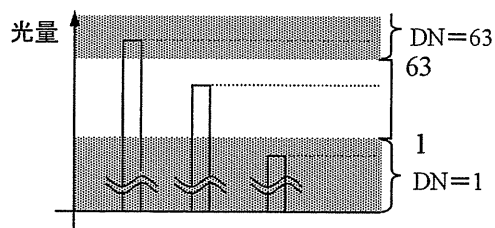


図 6-1 可視領域センサのゲインのしくみ

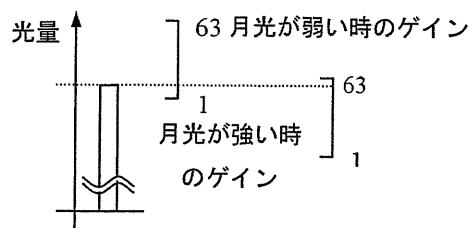


図 6-2 可視領域センサの月齢・月の高度変化に伴うゲイン調整のしくみ

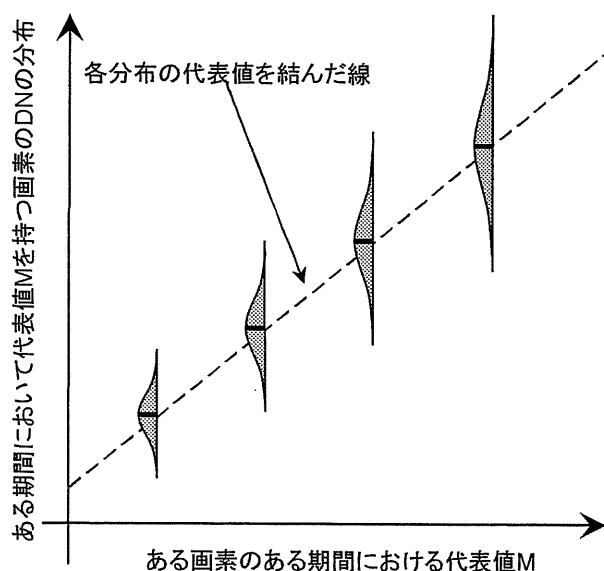


図 6-3 ゲインの幅が無限大の場合に、ある期間において代表値Mを持つ画素のDN値の分布

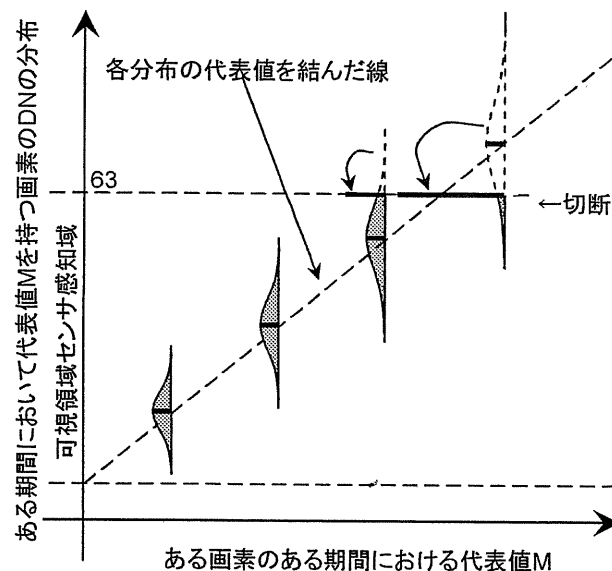


図 6-4 所定のゲインの幅がある場合に、ある期間において代表値 M を持つ画素の DN 値の分布

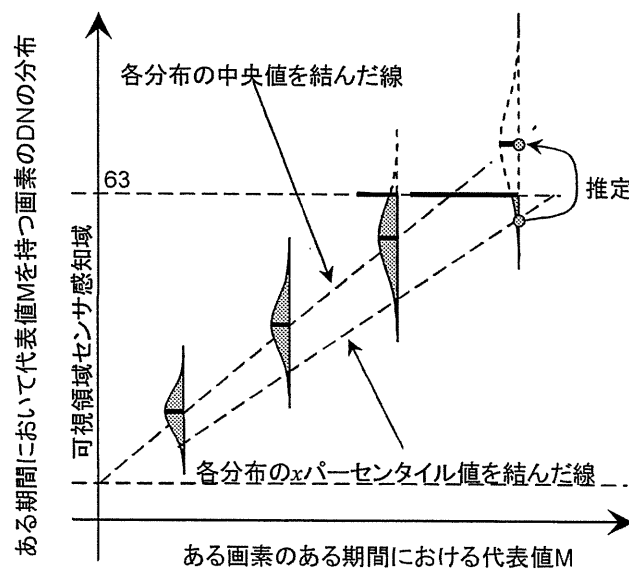


図 6-5 分位数系測度を用いたゲイン範囲外の DN 値分布形状の推定手法の概要

6.2.3. 分位数系測度を用いたゲイン範囲外の DN 値分布形状の推定

6.2.2.で考察したように、DMSP 衛星可視領域センサのゲインの上限の存在と、ゲインの上限があるにも関わらず各画素の DN 値分布の代表値として、平均値を用いたことが、光強度の強い領域において光強度の違いの情報が失われる原因となっている。ここで、再び図 6-3,4 に着目すると、仮に DN 値の分布の中心がゲインの上限を超えていたとしても、その分布のゲイン内の部分の形状は観測データから知ることができる。もし、この分布の形状が、その分布の代表値の大きさに対し安定的に変化するのであれば、ゲイン内に収まっている DN 分布の裾野の形状から、分布の中心の位置を推定できるはずである。

そこで、本論文では、DN 値の分布の代表値として、中央値を採用すると共に、ゲイン内に収まっている DN 値の分布形状を、分位数系の測度であるパーセンタイル値（以下 pt 値）を用いて表現し、見かけの DN 値の分布の中央値がゲインの上限に等しい画素について、ゲイン内で観測される DN 値分布の x_{pt} 値から中央値を推定することを提案する。この手法の概要を図 6-5 に示す。

6.2.4. 各画素の中央値に対する DN 値分布の安定性の確認

6.2.3.で提案する手法を用いるためには、各画素の中央値に対して DN 値の分布の形状の変化が安定的でなければならない。そこで、日本周辺領域（北緯 20～46 度，東経 122～152 度）について、1996 年 1 年間に於ける DMSP 夜間可視画像の日平均画像を作成し^{補注(2)}、ある中央値をもつ画素に於ける DN 値の分布形の安定性を確認した。図 6-6 に 1996 年 1 年間の中央値が 10,20,30,40,50,60 となった画素に於ける各 DN 値の出現確率を示す。中央値が大きくなるにつれて、分散は大きくなるものの、出現する DN 値の分布形は安定していることがわかる。また、中央値が大きくなるにつれ、図 6-4 に示したような DN 値の分布のゲイン上限による切断が、目立ってくることもわかる^{補注(3)}。次に、図 6-7 に各画素に於ける 1996 年 1 年間の DN 値の中央値と 5,10,25,50,75,90,95pt 値との関係を示す。分布の裾野に近い 5,10 及び 90,95pt 値の動きは不安定だが、25,75pt 値に関しては中央値に対してほぼ線形的に変化していることがわかる。以上の結果から、中央値が見かけ上飽和している画素においても、本来の中央値と 25pt 値の間には線形的な関係があることが伺える。そこで、この関係を利用して、25 pt 値から中央値を推定する式を定式化した。図 6-8 に 25pt 値と中央値の関係を示す。両者の関係を線形と仮定し、回帰係数を最小二乗法で求めたところ、式[1]が得られた。

$$M_o = 1.471DN_{25} - 1.854 \quad (r^2 = 0.993) \quad [1]$$

M_o : DN 値分布の中央値（ゲイン幅が無限大とした場合の本来の DN 値分布の中央値）

DN_{25} : DN 値分布の 25pt 値

見かけ上の中央値が飽和している画素について、その画素に於ける 25pt 値を式[1]に代入することで、当該画素の本来の中央値を外挿的に推定することができることになる。いうまでもなく、25pt 値も飽和する画素については、式[1]を適用できない。また中央値と 25pt 値の関係式は、都市光分布を推定する対象期間、地域毎に作成する必要がある。

6.3. 新手法および既存の手法にもとづく都市光分布の比較

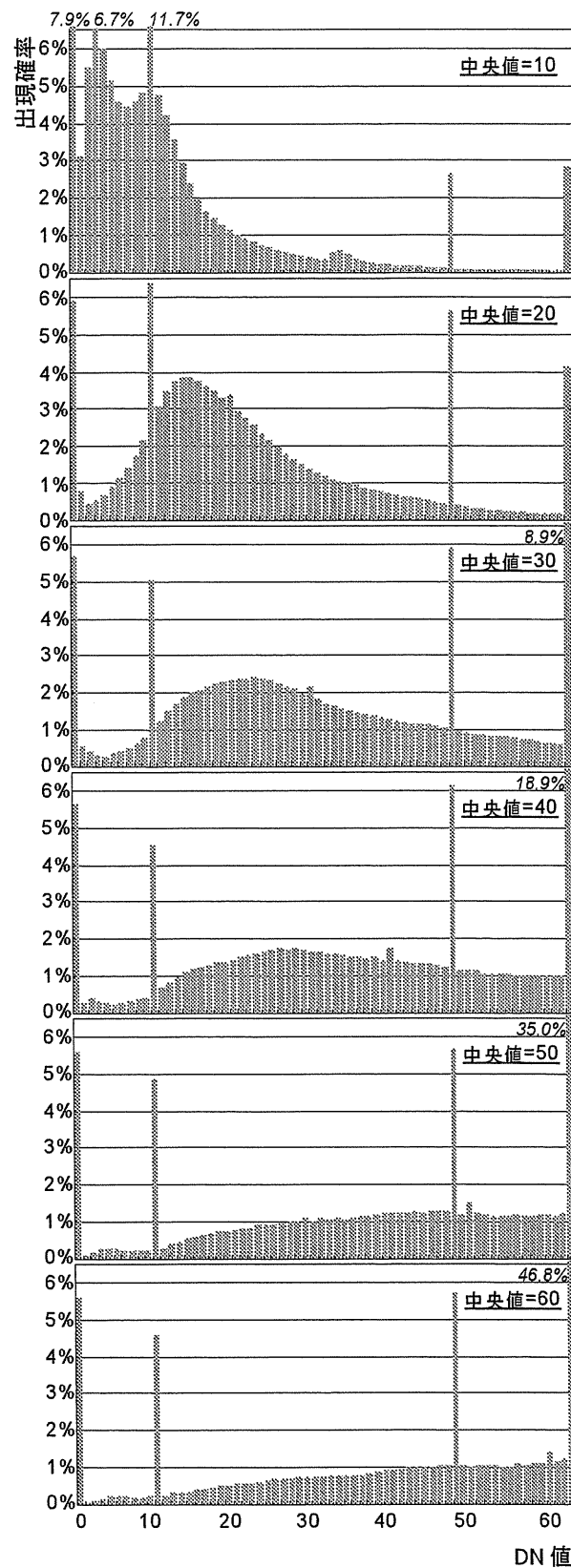


図 6-6 1996 年 1 年間の中央値が 10,20,30,40,50,60 と
なる画素における各 DN 値の出現確率分布

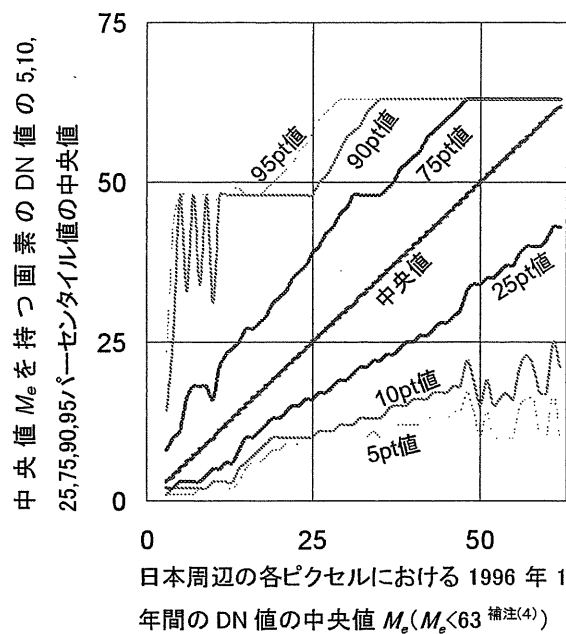


図 6-7 1996 年 1 年間に於いて中央値 M を持つ画素の DN 値分布の 5, 10, 25, 75, 90, 95pt 値の中央値

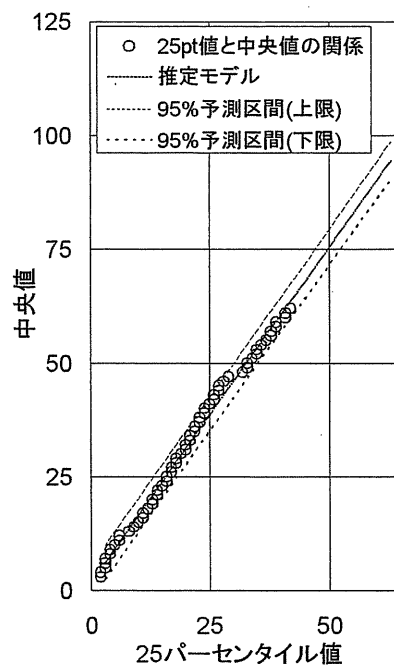


図 6-8 1996 年 1 年間に於ける 25pt 値と中央値の関係と中央値が飽和している画素の本来の中央値の推定モデル

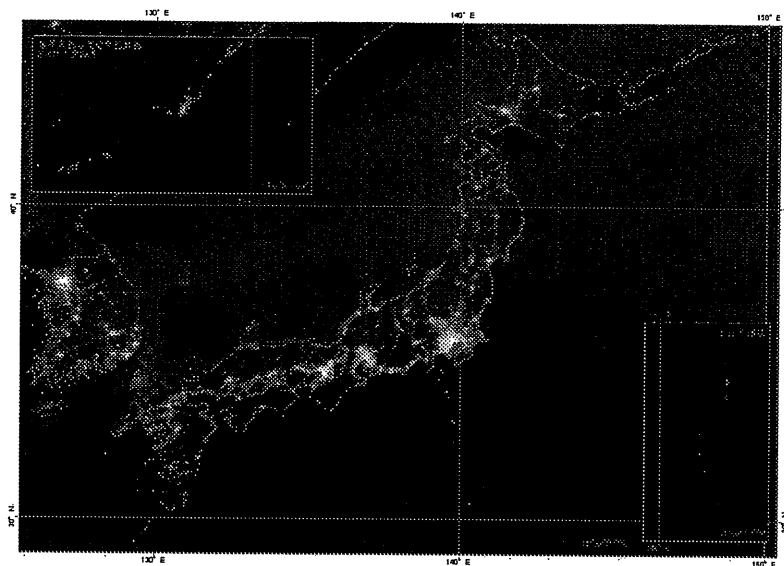


図 6-9 新手法を用いて推定した 1996 年における日本周辺の都市光分布

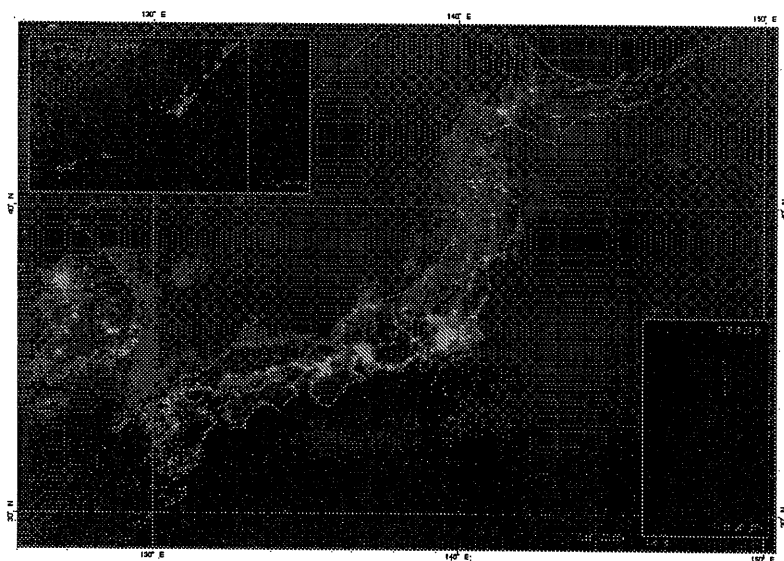


図 6-10 旧手法を用いて推定した 1996 年における日本周辺の都市光分布

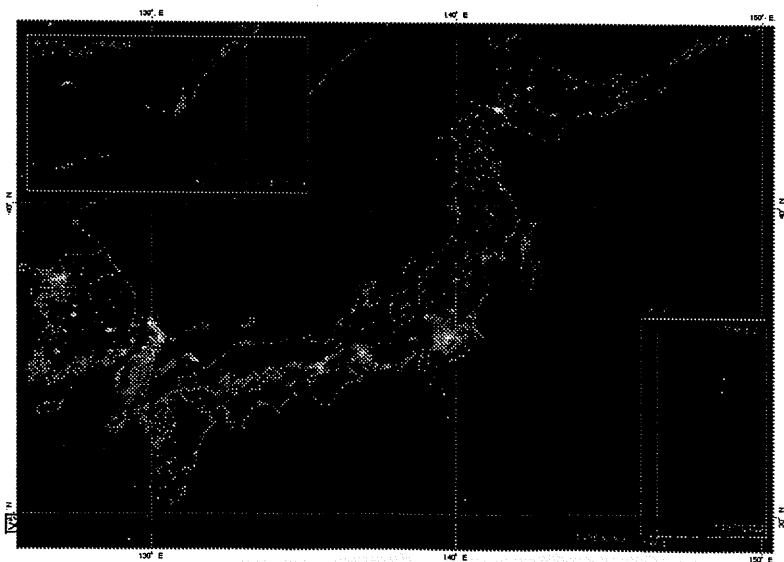


図 6-11 Elvidge et al. (1999)が作成した RCCL における日本周辺の都市光分布

旧手法にもとづく都市光分布および RCCL との比較により、新手法によって大都市域の都市光強度の違いがどの程度鮮明になるかを検証した。図 6-9 には、新手法を用いて本来の中央値を求めた場合の都市光分布、図 6-10 には、旧手法にもとづき各画素の DN 値を平均値で代表させた場合の都市光分布を示す^{補注(5)}。なお、図 6-9,10 は、同じグレースケールで表示されている。両者を比較すると、旧手法にもとづく都市光分布で飽和してしまっている領域において、新手法にもとづく都市光分布では都市光強度の違いが鮮明になっていることがわかる。図 6-11 には、図 6-9,10 と同じ領域における RCCL を示す。RCCL は都市光の飽和を避けるための特別なゲイン設定の下で観測された画像を用いて作成された都市光強度の絶対値の分布である。明らかに旧手法よりも新手法の方が RCCL に近い都市光分布をもたらしている。

図 6-12~14 は図 6-9~11 における関東地方を拡大し、市町村庁所在地点を重ね合わせたものである。各市区町村庁所在地点は、当該自治体の 1995 年時の人口規模に比例した半径の円で表現されている。旧手法にもとづく都市光分布では、大きな都市光の塊の中に、大小様々な人口規模の自治体が存在するように見える。一方、新手法にもとづく都市光分布では、関東平野の中でも特に人口規模の大きい自治体が集中している中心部と、都市光強度のピークが一致している。

図 6-15,16 は、新・旧手法にもとづく都市光分布と RCCL との関係を散布図で示したものである。旧手法では RCCL の値域の 1/3 の都市光強度で完全に飽和しているのに対し、新手法では RCCL の値域の 2/3 の都市光強度まで飽和を起さず線形性を保持しており、また飽和している画素数の割合も旧手法に比べはるかに少ない。以上のことから、新手法の方が、本来の大都市域内の都市光強度の違いをより忠実に反映できることが確かめられた。

6.4. 新手法にもとづく都市光分布と平成 7 年国勢調査メッシュ人口との関係

新手法によって大都市域内における都市光強度の違いをより忠実に反映できることが確認されたが、このことが人口推定においてどの程度貢献するかを、平成 7 年度国勢調査と 1995 年 1 年間の画像を用いて新・旧両手法に基づいて作成された都市光分布との比較により検証した。図 6-17,18 に、新・旧手法にもとづく都市光分布と平成 7 年国勢調査メッシュ人口との関係を示す。図 6-17,18 において、人口と都市光分布の比較は 3 次メッシュ単位で行われている。都市光分布の画素の大きさは、30arcsec であるため、メッシュ人口との比較が可能のように、3 次メッシュにリサンプリングした。図 6-17,18 について、人口と都市光分布との関係として、1 次関数、2 次関数、指数関数、べき乗関数を仮定し最小 2 乗法によって回帰係数を求めた結果以下のような結果が得られた。

・旧手法にもとづく都市光分布と人口との関係

1 次関数モデル

$$Pop = 104.124 DN - 1805.872 \quad (DN \geq 18) \quad (r=.634, r^2=.402, s_e=1037.778) \quad [2]$$

2 次関数モデル

$$Pop^{0.5} = 1.486 DN - 22.556 \quad (DN \geq 10) \quad (r=.749, r^2=.560, s_e=10.761) \quad [3]$$

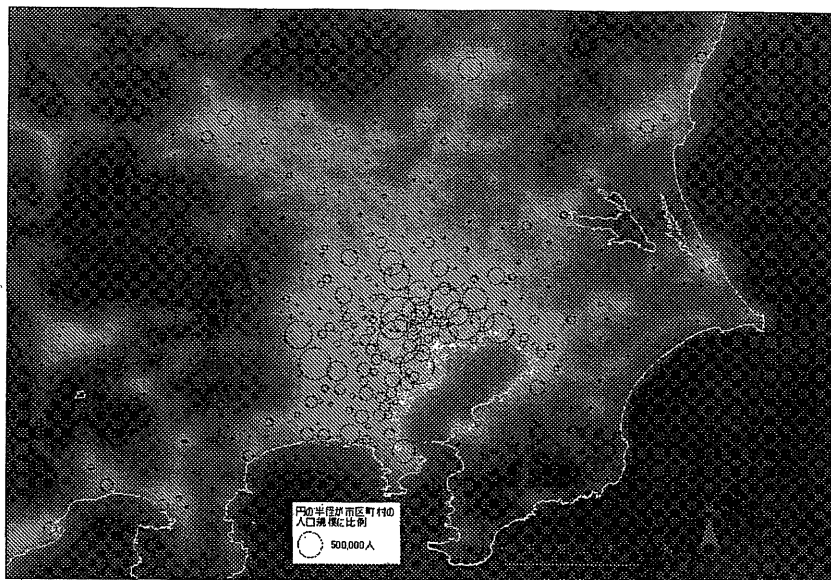


図 6-12 新手法を用いて推定した 1996 年における関東地方の都市光分布

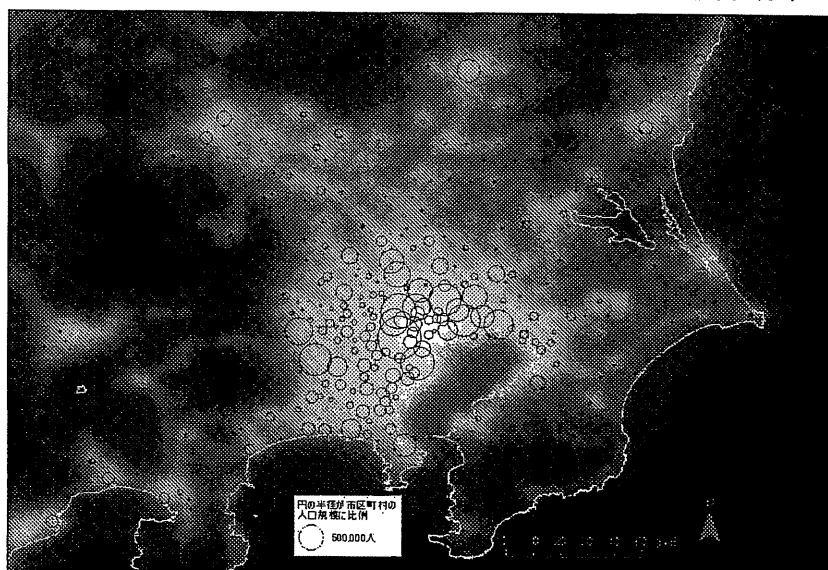


図 6-13 旧手法を用いて推定した 1996 年における関東地方の都市光分布

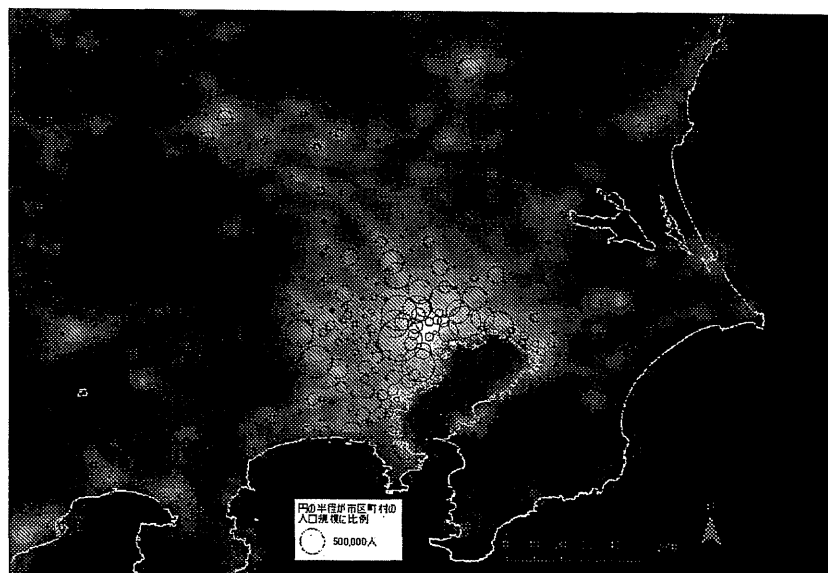


図 6-14 Elvidge et al. (1999)が作成した RCCL における関東地方の都市光分布

指数関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 0.207 DN - 2.159 \quad (DN \geq 11) \quad (r = .613, r^2 = .376, s_e = 2.176) \quad [4]$$

べき乗関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 5.588 \log(DN) - 14.489 \quad (DN \geq 3) \quad (r = .619, r^2 = .383, s_e = 2.165) \quad [5]$$

・新手法にもとづく都市光分布と人口との関係

1 次関数モデル

$$Pop = 81.539 DN - 1049.191 \quad (DN \geq 13) \quad (r = .702, r^2 = .492, s_e = 956.623) \quad [6]$$

2 次関数モデル

$$Pop^{0.5} = 1.096 DN - 10.623 \quad (DN \geq 10) \quad (r = .780, r^2 = .608, s_e = 10.157) \quad [7]$$

指数関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 0.145 DN - 0.336 \quad (DN \geq 3) \quad (r = .606, r^2 = .367, s_e = 2.192) \quad [8]$$

べき乗関数モデル

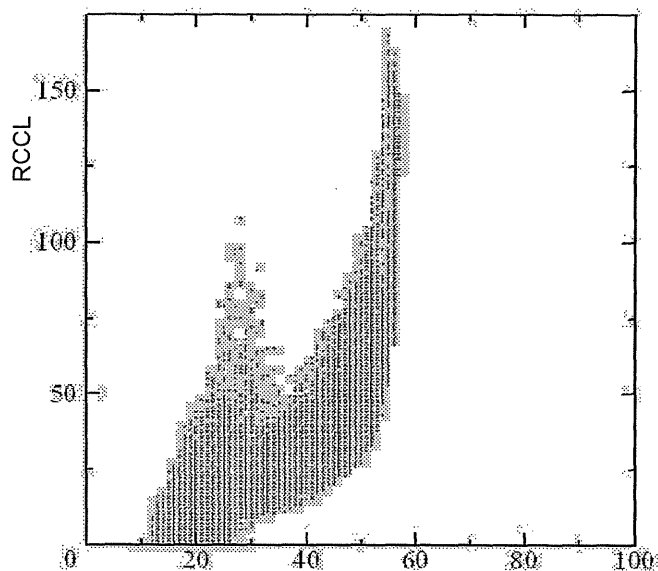
$$\log(Pop + 1) = 3.882 \log(DN) - 8.384 \quad (DN \geq 3) \quad (r = .634, r^2 = .401, s_e = 2.132) \quad [9]$$

ここで Pop : 平成 7 年国勢調査メッシュ人口, DN : 都市光強度, r : 相関係数, r^2 : 決定係数, s_e : 推定の標準誤差, なお, データ数 $N=386,158$

両者とも 2 次関数を仮定した場合の r^2 値がもっとも大きいことがわかった。図 6-17,18 には, この 2 次関数モデルおよび 95%信頼区間に対応する曲線もあわせて示した。2 つのモデルの r^2 値を比較すると, 新手法にもとづく都市光分布を用いた方が r^2 値が大きい。しかし, より重要な点は, これらのモデルによって, 都市光分布から人口を推定しようとした場合, 旧手法にもとづく都市光分布を用いた場合には, DN 値が 50 以上の領域において, 極端に過小評価をしてしまうメッシュが生じることである。一方, 新手法を用いた場合には, より広い範囲の光強度の違いを識別できているため, 人口の極端な過小・過大評価が生じなくなっている。よって, 本論文で提案する手法にもとづく都市光分布の方が, 人口等, 災害リスク評価に必要な基礎データの推定を行う上で有利であるといえる。

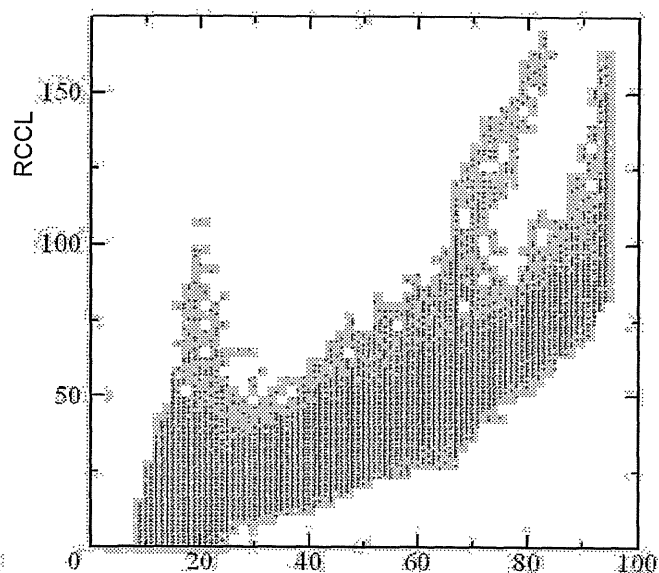
6.5. 結論

本研究では, DMSP 夜間可視画像時系列データの画素単位の観測値分布が, 各画素の中央値に対し安定的であることを利用して, DMSP 可視領域センサの感知域の上限を超える強い光源を有する大都市域内の都市光強度の中央値を, その画素の 25pt 値から推定する手法を提案した。この手法によって得られる画像は, 特に大都市域内の都市光強度の違いをより鮮明に示しており, 人口分布の推定により適していることが明らかになった。今回提案した手法の利点は, ある画素のある期間における見かけ上の中央値が飽和していても, その画素の DN 値の分布形状から, ゲインの外側に想定される本来の中央値を推定できる点である。従来は, 観測値の飽和を避けるために, 米国空軍に依頼し, 特別なゲイン設定を要請する必要があった。本研究で提案する手法は, 通常観測時に得られる画像から本来の DN 値の分布の代表値を得られるという点で意味が大きい。



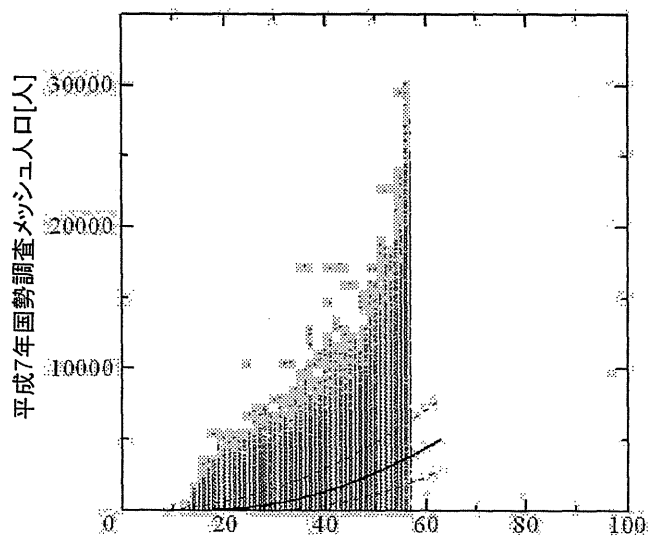
旧手法にもとづく都市光強度分布

図 6-15 旧手法にもとづく都市光分布とRCCLとの関係



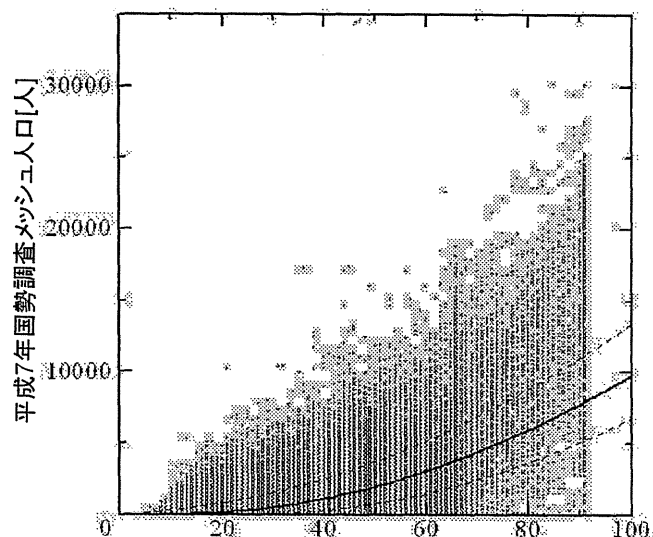
新手法にもとづく都市光強度分布

図 6-16 新手法にもとづく都市光分布とRCCLとの関係



旧手法にもとづく都市光強度分布

図 6-17 旧手法にもとづく 1995 年の都市光分布と平成7年
国勢調査メッシュ人口との関係



新手法にもとづく都市光強度分布

図 6-18 新手法にもとづく 1995 年の都市光分布と平成7年
国勢調査メッシュ人口との関係

著者らは、小檜山ら(2001)の DMSP 夜間可視画像を用いた早期被害推定手法との組合せにより、最終的には、都市光分布時系列データを用いて、災害発生前においては、人口・建物棟数と言った災害リスク評価に必要なデータを推定し、災害発生直後においては、早期の被災地把握を行い、災害復旧・復興期においては、その進捗状況をモニタリングする、グローバルに適用可能な災害情報収集支援システムの構築を目指している。今回は、1 年分の画像をもとに各画素における DN 値の分布を求めたが、仮に 30 日分の画像から、各画素における DN 値の安定した分布が得られれば、当該期間における見かけの中央値が飽和していたとしても、その 25pt 値から本来の中央値を推定することが可能となる。30 日分のデータセットを、1 日ずつずらしながら、移動平均ならぬ「移動 25pt 値」を計算していくことにより、観測値が飽和しがちな画素においても、本来の中央値の時間変化を追うことが可能となる。このような技術は、都市光強度の時間変化から、都市部の災害の復興プロセスを追跡する上で不可欠である。そのような応用を可能にするには、今後、各画素の DN 値の安定した分布を得るのに何日分の画像が必要となるかを明らかにする必要がある。

7. 夜間都市光分布を用いた広域の人口・建物棟数分布の モニタリング-東海地震の被害想定への適用-

7.1. はじめに

人間の営みの存在しない場所では、災害は発生しない。妥当な被害想定結果を得る上で、地域における人口・建物棟数といった被害の発生源（被害ポテンシャル）の空間分布の把握は、精度の高い自然外力の推定と同様、重要である。従来は被害ポテンシャルの収集には、社会・経済統計が用いられてきた。例えば、長谷川・翠川（1997,1999）は、国勢調査と事業所統計の3次メッシュ統計を用いた構造別・年代別建物棟数推定手法を提案している。しかし、社会・経済統計を用いる際には、集計単位の解像度か、データの新しいさのいずれかをあきらめざるを得ない。特に、発展途上国においては、空間解像度の高い社会・経済統計が未整備であり、災害対策の必要性が高いにも関わらず、発生しうる被害の評価すらままならないことが多い。

また、東海地震あるいは東南海・南海地震のように被災地が広域にわたる場合、個々の自治体だけでなく、被災地域とその周辺を含めた国レベルでの防災戦略が必要となる。広大な想定被災地域に対して防災戦略をたてる一例えば、限られた資源の配分や、地域間の連携のあり方を検討する一ためには、広大な被災地の階層化・構造化が不可欠である。このような広大な被災地の階層化・構造化を行政界に基づいて行うことは必ずしも適切ではない。なぜなら、そのような大規模地震災害においては、複数の行政界にまたがる人間の営みの大きな空間的つながり、いわゆる“都市圏”が、丸ごと被災地となる可能性があるからである。同一都市圏内における人間の営みはある種の運命共同体にあると考えれば、被害想定および防災計画もそのような都市圏を意識したものとするべきである。

この問題に対し、高島・林（2001, 2002）では、米国の軍事気象衛星 DMSP（Defense Meteorological Satellite Program）が捉える夜間都市光分布を用いて、グローバルに被害ポテンシャルを推定する手法を提案した。この手法の枠組みを図 7-1 に示す。DMSP 衛星が捉える夜間可視画像の特性に関しては Elvidge et al（1997）に譲る。高島・林（2001）では、DMSP 衛星が日々捉える夜間可視画像を大量に重ね合わせることで、都市光をバイアスの入らない形で、かつ短時間で抽出する手法を提案した。高島・林（2002）では高島・林（2001）の手法によって抽出された都市光分布と、国勢調査にもとづく人口分布、および国勢調査と事業所統計から長谷川・翠川（1997,1999）の手法によって推計される構造別建物棟数の関係をモデル化することにより、都市光分布から、人口・建物棟数を推定する手法の提案とその検証を行った。また、被災地が複数の行政界にわたるような広域災害に対する被害想定および防災計画立案の単位として都市圏を同定する手法を提案した。さらに、都市光分布のモニタリングの継続性確保のため、異なるプラットフォーム間の画像補正手法を提案した。

これらの一連の研究により、DMSP 夜間可視画像が日々捉える夜間都市光を用いて継続的に被害ポテンシャルを推定することが可能となった。本論文では、この一連の手法の適用事例として、近い将来の発生が危惧されている東海地震（想定東海地震）が 2000 年に発生していた場合に関して被害想定を行った。想定東海地震がもたらしうる地震動については、

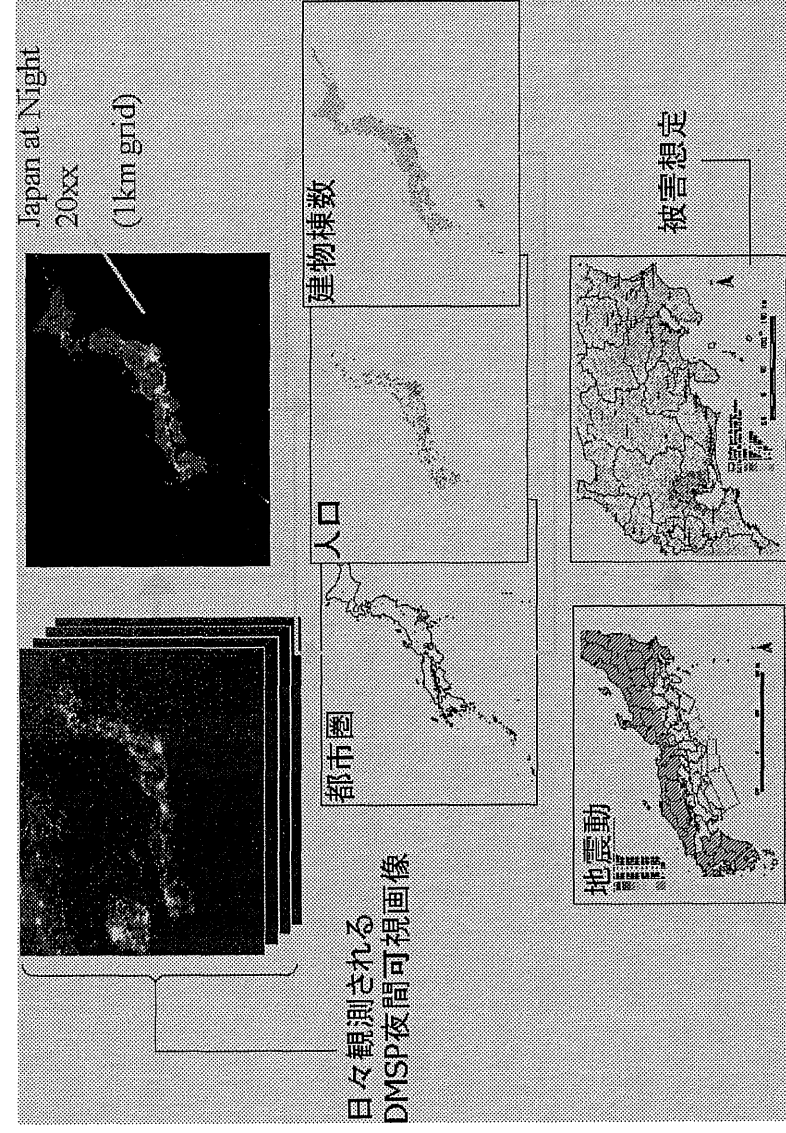


図 7-1 DMSP 夜間可視画像が捉える都市光分布を用いた被害ポテンシャル推定手法の枠組み

中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」及び「東海地震対策専門調査会」において検討されたものを用いた。想定項目としては、都市光分布からその被害ポテンシャル分布を推定可能な構造別の建物被害と建物倒壊による人的被害とした。1km メッシュ単位の被害想定結果を都市圏を用いて集計することにより、想定東海地震によってどの都市圏が大きな影響をうけるのかを明らかにすると共に、この広大な被災地をもたらす地震に対する、資源配分のあり方、自治体間の連携のあり方について考察した。

7.2. 想定に用いる被害ポテンシャルの推定

想定年となる 2000 年の人口分布および木造・非木造別建物棟数を推定するため、高島・林 (2001) の提案する手法にもとづき、2000 年における日本の平均的な都市光分布 “Japan at Night 2000” を作成した。Japan at Night 2000” に基づき、高島・林 (2002) の提案する手法を用いて、1km メッシュ単位での人口分布、木造・非木造別建物棟数を推定した。中央防災会議の被害想定では、木造家屋を築年別に 1960 年以前築、1961 年～1980 年築、1981 年以降築の 3 グループに分類し、グループ毎に被害を評価している。都市光分布からは、逐年別の木造家屋棟数は求められない。そこで、木造家屋のほとんどは住宅と仮定し、平成 10 年住宅土地統計調査における都道府県別・住宅の建築の時期別割合を用いて、各築年グループ別の木造家屋棟数を求めた。建物倒壊に伴う死者数の推定には、木造・非木造建物別の屋内人口を推定する必要がある。この建物構造別の屋内人口は、“Japan at Night 2000” により推計された人口をもとに、地震被害想定支援マニュアル (2001) で提案されている手法を用いて推定した。屋内人口は、平日か休日か、また時間帯によっても大きく変化する。このような特性を反映させるため、地震被害想定支援マニュアル (2001) では、国民生活時間調査 (NHK 放送文化研究所 (1995)) にもとづいた、平日/休日別・時間帯別の屋内滞留人口の推定手法を提案している。この手法において求められる各時間帯における屋内人口は、9 時から 19 時までは昼間人口、19 時から翌日 9 時までは夜間人口にもとづいている。高島・林 (2002) において提案した人口推定手法は、居住地ベースの人口すなわち夜間人口を推定するものである。そこで、本想定では、地震が平日夜 2 時に発生した場合を想定することとし、この時点における 1km メッシュ毎の屋内滞留人口を算出した。

7.3. 想定結果の統合に用いる都市圏レベル

高島・林 (2002) では、人口規模別の 9 つの都市圏レベルを規定する都市光の閾値を提案している。また、1995 年から 2000 年にかけての各レベルの都市圏クラスターの増減を示している。それによれば、この 5 年間に於いて安定的に存在していたのは、レベル 5 都市圏であったことがわかっている。そこで、本論文における被害想定においては、レベル 5 都市圏 (1km メッシュあたり 500 人以上の都市圏) を想定結果の統合に用いることとした。

7.4. 東海地震がもたらしうる外力

想定東海地震がもたらす地震動としては、中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」及び「東海地震対策専門調査会」において検討された想定東海地震に関する 500m メッシュの地表面震度分布を用いた。中央防災会議から公開されている震度分布データには、2通りの震源域の破壊開始点と2通りの破壊様式を組み合わせた計4通りの地震発生過程に基づく震度分布と、それら4つの震度分布の最大値の分布が含まれている。本研究ではこれらのうち、最大値の分布を用いた。図 7-2 に本研究で用いた震度分布を示す。本研究では、1km メッシュ単位で被害の想定を行うため、各 1km メッシュの震度を、そのメッシュが含む4つの 500m メッシュにおける震度の平均値で代表させた。

7.5. 被害の推定

建物被害の推定には、中央防災会議・東海地震対策専門調査会（2003）が想定東海地震の建物被害想定に利用している被害率テーブルを用いた。中央防災会議の手法では、木造家屋を築年別に 1960 年以前築、1961 年～1980 年築、1981 年以降築の 3 グループに分類し、グループ毎に異なる被害率テーブルを用いている。死者数については、地震被害想定支援マニュアル（2001）で提案されている手法に従い、屋内滞留人口と建物全壊率から推定した。

7.6. 想定結果

木造・非木造別の全壊建物棟数と死者数の想定結果を図 7-3～5 に示す。どの被害に関しても、駿河湾湾奥部から三河湾東岸までの、太平洋沿岸から約 30km 以内の領域で被害が集中的に発生するという結果が得られた。想定結果を都道府県別に統合した結果を表 7-1 に示す。本論文の想定では、建物全壊被害の総計は、およそ 16 万棟、建物倒壊による死者の総数は、1 万 5 千人に及ぶという結果となった^{補注(2)}。被害の発生は静岡県をはじめ、5 県、137 市区町村に及び、そのうちの多くが静岡県内の市町村に集中して発生することが明らかになった。表 7-1 には想定東海地震に関する専門調査会の想定結果も合わせて示した。本研究における想定結果では、静岡県以外の県でやや被害が小さく評価される傾向があるが、両者はおおよそ一致している。図 7-3～5 には、レベル 5 都市圏の圏域も合わせて示したが、特に被害の大きかった領域はレベル 5 都市圏とほぼ一致している。このように、想定東海地震では、広大な強震動領域に内包される都市圏で大きな被害が生じるという被害の発生形態が想定される。

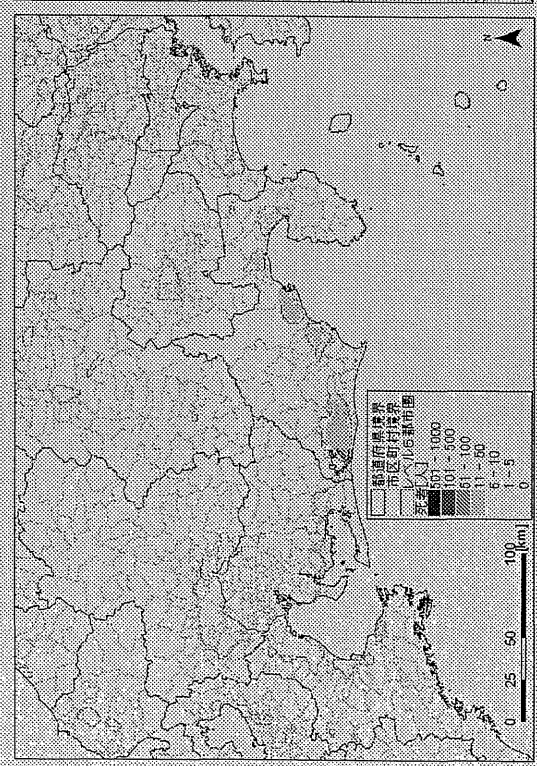
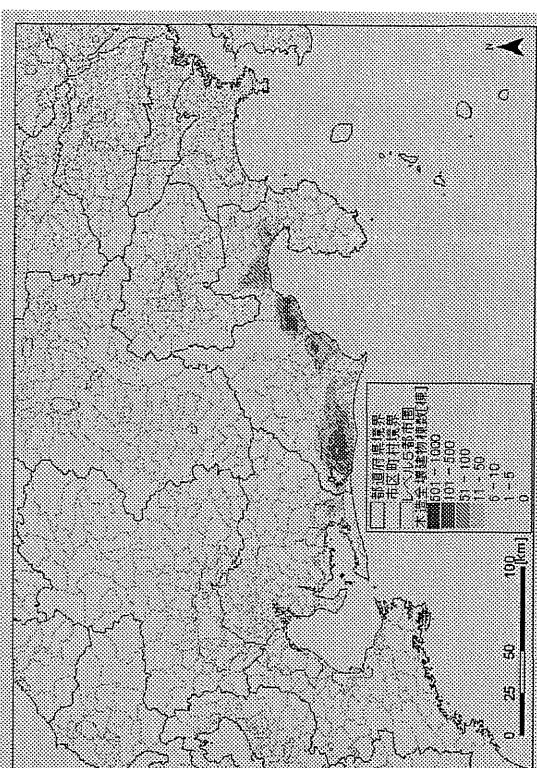
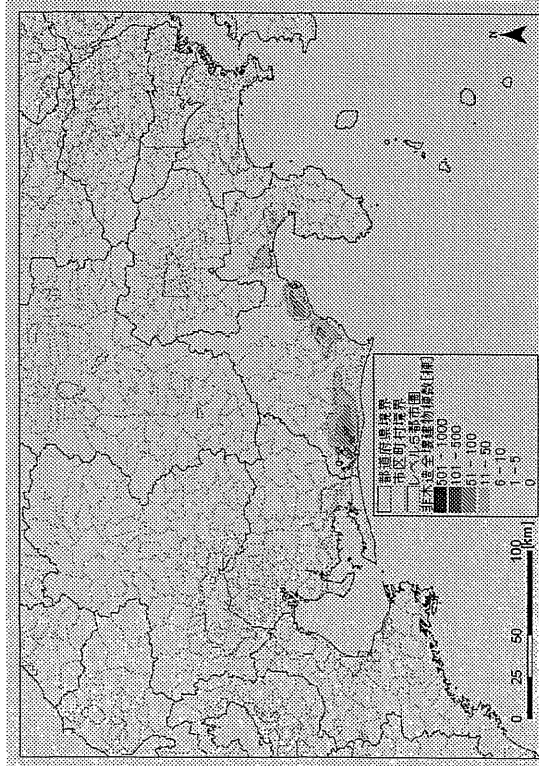
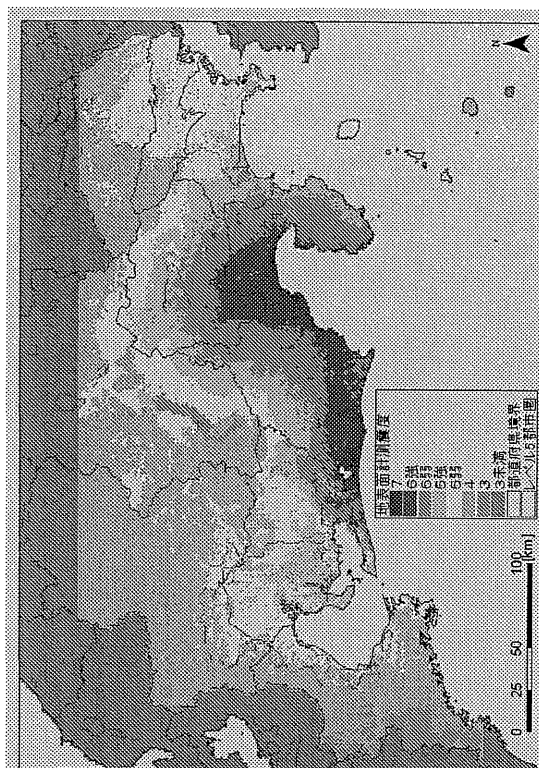


表 7-1 想定東海地震に対する本研究における想定結果と中央防災会議における想定結果(都道府県別)

	本研究における想定結果				中央防災会議における想定結果 ^{*1} ^{*2}			
	木造全壊建物	非木造全壊建物	全壊建物棟数	死者	全壊建物棟数		死者数	
					S1	D1	S1	D1
東京都	0	0	0	0	0	0	0	0
神奈川県	90	37	127	8	100	1000	0	40
山梨県	435	66	501	33	2900	5800	100	300
長野県	57	0	57	0	1300	1300	70	70
岐阜県	0	0	0	0	0	0	0	0
静岡県	113567	43437	157004	14938	160000	140000	6100	5500
愛知県	4287	1768	6055	409	11000	4700	300	100
三重県	0	0	0	0	0	0	0	0
総計	118436	45308	163744	15388	175300	152800	6570	6010

^{*1}表中、中央防災会議の想定結果は、朝5時に発生し、予知情報が無かった場合のものである。

^{*2}S1:応力降下量一定モデル、震源域の破壊開始点は西側、D1:変位量一定モデル、震源域の破壊開始点は西側

表 7-2 想定東海地震に対する本研究における想定結果をレベル5都市圏毎に統合した結果

都市圏	発生数			発生率			構成比		
	木造建物 全壊	非木造建物 全壊	死者	木造建物 全壊	非木造建物 全壊	死者	木造建物 全壊	非木造建物 全壊	死者
関東圏	88	35	8	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.10%	0.06%
名古屋圏	502	39	21	0.02%	0.00%	0.00%	0.56%	0.11%	0.16%
浜松・豊橋圏	51393	20936	7176	19.66%	11.27%	0.54%	56.96%	59.49%	54.03%
甲府圏	199	9	27	0.31%	0.02%	0.01%	0.22%	0.03%	0.20%
静岡・清水圏	19841	7279	2890	32.39%	17.22%	0.88%	21.99%	20.68%	21.76%
焼津・藤枝圏	9197	3472	1501	23.56%	13.48%	0.66%	10.19%	9.87%	11.30%
沼津・三島圏	3869	1759	642	12.06%	8.26%	0.32%	4.29%	5.00%	4.83%
津・松阪圏	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
松本圏	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
富士・富士宮圏	5068	1650	1012	31.71%	16.59%	0.90%	5.62%	4.69%	7.62%
伊勢圏	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
諏訪圏	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
川口湖圏	13	0	0	0.53%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%
御殿場圏	29	6	2	1.29%	0.43%	0.02%	0.03%	0.02%	0.02%
飯田圏	14	0	0	0.68%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%
名張圏	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
上野圏	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
浜岡圏	20	9	3	10.64%	7.69%	0.33%	0.02%	0.03%	0.02%
被災レベル5都市圏計	90233	35194	13282	1.46%	0.57%	0.04%	100.00%	100.00%	100.00%
総計	118436	45308	15388	—	—	—	—	—	—

7.7. 都市圏を用いた被災地の構造化

7.6.で想定された 1km メッシュ単位の被害を、レベル 5 都市圏をもちいて再統合した。各都市圏における構造別建物総棟数および総人口に占める、構造別全壊建物棟数、建物倒壊による死者数の割合を図 7-6~8 に示す。また、各都市圏別の各被害の集計結果を表 7-2 に示す。全国で 138 あるレベル 5 都市圏のうち、12 の都市圏で建物の全壊あるいは建物倒壊による死者が推定された。また、レベル 5 都市圏内で発生した被害は、想定された全建物全壊棟数の 75%以上、全死者数の 85%以上を占めることが明らかになった。木造建物の全壊被害発生率についてみると、静岡・清水圏、富士・富士宮圏の 30%以上を筆頭に、焼津・藤枝圏で 24%、沼津・三島圏で 10%の高い被害発生率が推定された。非木造建物に関しても同様に、静岡・清水圏、富士・富士宮圏で 10%以上、焼津・藤枝圏で 9%、沼津・三島圏で 5%の高い被害発生率が推定された。建物倒壊による死者に関しては、富士・富士宮圏、静岡・清水圏で 0.9%、焼津・藤枝圏、浜松・豊橋圏で 0.5%以上、浜岡圏、沼津・三島圏で 0.3%以上の死者発生率が推定された。

被害想定の結果明らかになった被害状況に対して、その絶対数に見あう水準まで資源を増強させることは、現実には、予算制約上困難であることが多い。その場合、現有資源の最適な配置が重要になってくる。被害の種類別に、レベル 5 都市圏内で推定された被害全体に対する各レベル 5 都市圏の被害の比率を表 7-2 にあわせて示す。表 7-2 のうち、木造建物の全壊に関する各都市圏の構成比を円の面積で示したものを図 7-9 に示す。おおむね、どの被害に関しても、浜松・豊橋圏、静岡・清水圏、焼津・藤枝圏、富士・富士宮圏、沼津・三島圏においてレベル 5 都市圏で発生する被害の約 90%を占め、この 5 つの都市圏の相対的な被害の比率は、およそ 10:4:2:1:1 となった。このように、被害全体に対する、都市圏間の比率を明らかにすることで、国全体として、東海地震に対する対策を考える際に、各都市圏への資源配分のあり方について一つの指針を示すことができる。

以上の結果から、想定東海地震が発生した場合には、浜松・豊橋圏が他の都市圏に比べ特に大きなインパクトを受けることが明らかになった。想定東海地震によって被害が発生するレベル 5 都市圏は複数の自治体を内包している。このような都市圏においては、内部自治体間の広域連携による、防災対策の効率化の効果が大きいと考えられる。

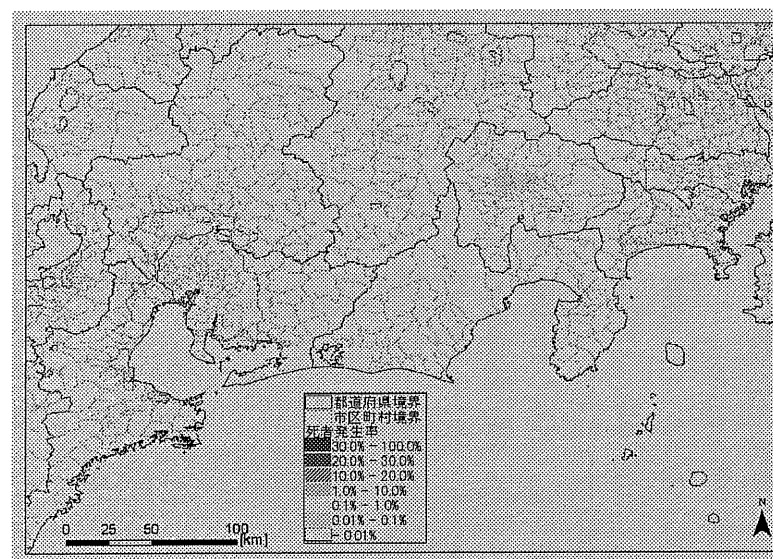


図 7-8 レベル5都市圏毎の建物倒壊による死者発生率

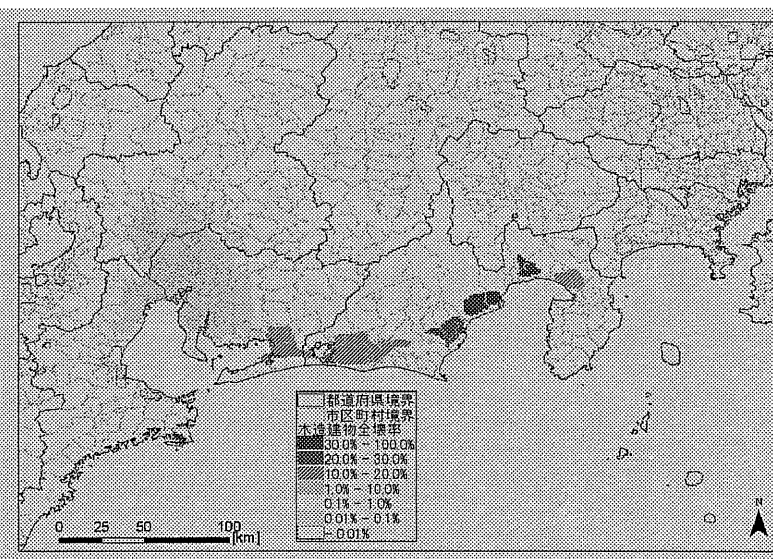


図 7-6 レベル5都市圏毎の木造建物全壊率

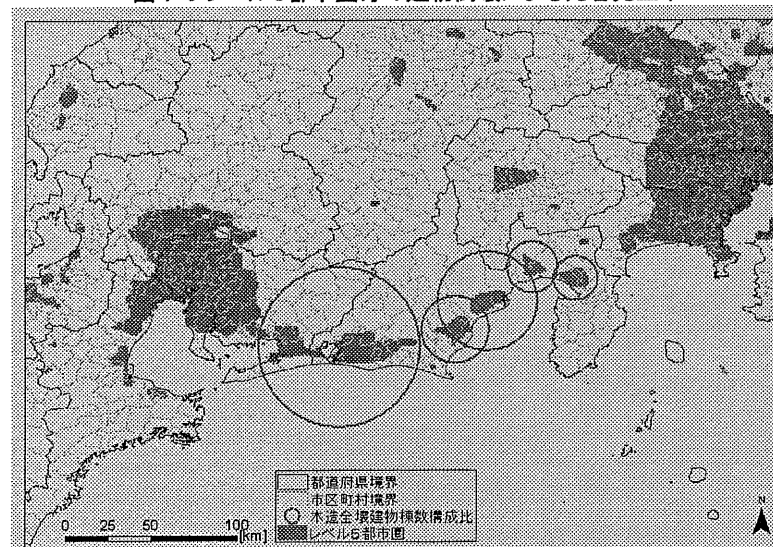


図 7-9 全レベル5都市圏で発生した木造全壊建物被害に占める各都市圏の割合

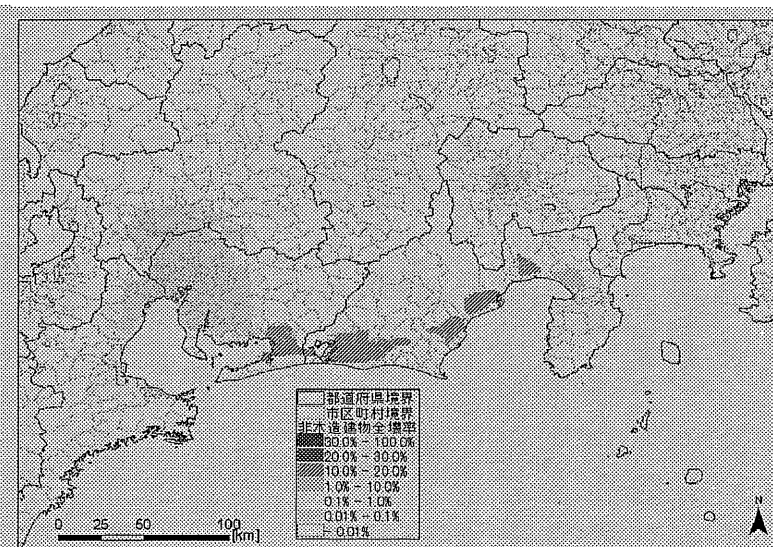


図 7-7 レベル5都市圏毎の非木造建物全壊率

7.8. 結論

本論文では、高島・林（2001, 2002）において提案した被害ポテンシャル推定手法を想定東海地震の被害想定に適用し、これらの地震が発生した場合に相対的にどの都市圏に大きな影響が発生しうるかを明らかにした。本研究で被害想定をおこなった想定東海地震は、個々の自治体における備えだけでなく、国レベルでの防災戦略が必要な事例の一つである。このようなスケールにおいては、社会システムの状態や、自然外力の複雑な空間分布を最大限に考慮するために、高い空間解像度での被害の推定が要求される一方、その結果大量に発生する情報を、どのような形で統合し、戦略の立案に携わる人々が取り扱い可能なレベルまで抽象化するかという問題が発生する。この問題に対し、高島・林（2001, 2002）で提案された手法は、単に高解像度で被害ポテンシャルをモニタリングできるだけでなく、より人間の営みの空間的連続性を反映した都市圏を情報の統合の枠組みとして提供できるという点で、マクロな視点からの防災戦略立案支援に適したものであるといえる。

8. 高解像度衛星画像・GPS ビデオカメラを用いた 建物インベントリー推定手法の確立 ーフィリピンのマリキナ市を事例としてー

8.1. はじめに

最近の地震では、2001年1月26日のインド西部地震(マグニチュード7.7)では死者20,000人以上、2003年5月21日のアルジェリア地震(マグニチュード6.7)では死者約2,000人以上、2003年12月26日のイラン・バム地震(マグニチュード6.5)でも死者40,000人以上と、途上国において甚大な人的被害が発生している。

このような状況において、地震防災に関する研究は世界の様々な機関で行われている。また、途上国の地震防災力の向上を直接の目標とした取り組みとして、国際連合を中心とする枠組みの中で、国際防災の10年(IDNDR)におけるRADIUSプロジェクトや、GESIプロジェクトの活動が行われている。しかし、このような途上国の地域性に即した研究の絶対数は多いとはいえない。また、多くの途上国は経済的な問題を多く抱えており、先進国と同じ程度に人、物資、資金、時間といった資源を防災対策に投入することが困難である。したがって、途上国の地震防災力向上のためには、途上国の側の能力開発を図る手段として、その国の経済状況に即した地震防災対策手法が必要である。

地震防災力向上のためには、まず、地震災害の被害想定が必要不可欠である。どこに、どの程度の規模の地震がいつ発生するのか、それによって人々の暮らしにどのような被害が生ずるのかを知ることが適切な防災対策を実施する前提となるからである。

地震災害の被害想定には、地震の震源や震度分布といった外力の同定、外力と被害の関係性を表す被害関数、被害の対象となる建物や人の集積状況に関するデータの三つの要素が必要である。まず、途上国における被害想定を考えると、外力については様々な国際的機関が世界的に地震の外力について研究しており、例えば、GSHAPでは、世界における地震動の分布をWEBにおいて提供している。外力と被害の関係を表す被害関数に関しても、様々な機関において研究されており、途上国を対象とした代表的な手法がGESIであり、比較的簡易で利用性の高い手法を提唱し、すでに世界の21の都市において実施されている。最後の被害想定に必要な地域固有の建物や人のデータは、地域それぞれが自ら作成し、所有すべきデータであるが、経済状況などからこうしたデータを用意できない途上国が多い。以上まとめると、途上国において被害想定を行う際のボトルネックは、対象とする地域の建物や人の集積状況、つまりインベントリーデータをどのように確保するかであることがわかる。

地震被害は大きく物的被害と人的被害に分けられる。しかし、途上国では人的被害も住宅倒壊による圧死から生じるものが多い。そのため、地震の被害想定には、物的被害、特に住宅被害の想定が必要不可欠である。そこで、途上国において地震防災力の向上の前提として地震被害想定を行う場合には、住宅被害を想定するために必要な建物の棟数、種別といった建物インベントリーを簡易に作成する手法の開発が求められている。

本研究では、全世界をカバーする高解像度の衛星画像の解析とGPSと連動したビデオカメラを利用した現地調査を組み合わせ、GESI法を用いた被害想定を行うために必要とな

る建物インベントリーを簡易に作成する手法を提案する。

8.2. 研究の概要

8.2.1. 高解像度衛星画像と GPS ビデオカメラを利用した建物インベントリー推定手法の開発プロセス

本研究では、建物インベントリー推定手法を開発するために、以下のような手順で作業を行った。

- ①衛星画像を用いて対象地をメッシュ化した。
- ②多様な土地被覆を有するラーニングエリアを選定した。
- ③ラーニングエリアにおいて、4種類のメッシュサイズで土地被覆分類を行った。
- ④ラーニングエリアに存在する建物ポリゴンデータを用いて、4種のメッシュサイズのうち最適なメッシュサイズを決定した。
- ⑤対象地全域の土地被覆を推定した。
- ⑥ラーニングエリアにおける建物ポリゴンデータを用いて、対象地全域の建物棟数を推定した。
- ⑦ラーニングエリアにおいて現地調査を行い、GPS ビデオカメラを用いて家並みを連続撮影した。
- ⑧撮影資料をもとに、ラーニングエリアのメッシュごとの建物棟数・建物種別を決定した。
- ⑨対象地全域の建物棟数・建物種別を推定した。
- ⑩最後に①～⑨の結果をもとにして、建物インベントリー推定手法を提案した。

8.2.2. 高解像度衛星画像の利用

衛星画像を利用した研究は様々な分野で行われている。特に衛星 LANDSAT を用いた研究は農業、環境、資源などの多くの分野で行われている。LANDSAT では、水面、森林、草地、裸地、市街地といった土地被覆の基礎的な分類が比較的容易である。しかし、LANDSAT が持つ 1 ピクセル 30m グリッドという精度では、市街地をさらに細分化して、建物種別や棟数を判定することは難しいとされている。

本研究では、建物インベントリーを作成することが目的であり、市街地をさらに細分化し、建物レベルまでの詳細な分析が必要となる。そこで、1 ピクセル 1m グリッドの精度を持つ衛星 IKONOS を用いることで、LANDSAT レベルの精度では、市街地と判定される大きさのグリッドをより詳細に分析する手法の開発を試みた。7 バンドのセンサーを持つ LANDSAT では、最小単位である 30m×30m の 1 ピクセルに 7 データポイントが存在する。これに対して 4 バンドのセンサーを持つ IKONOS の場合には、LANDSAT に対応する 30m グリッドであれば、 $30 \times 30 \times 4 = 3600$ データポイントが存在することになる。つまり、LANDSAT では 7 センサーの値のパターンで市街地と判定された区域を、1m グリッドで得られる IKONOS の 4 センサーのそれぞれについて、合計 3600 データポイントの分布パターンを解析することで、建物種別と棟数を推定することの可能性を検討した。

衛星 IKONOS はスペースイメーシング社が 1999 年に打ち上げた民間の商用衛星である。IKONOS は地球の周りを高度 680km で飛行しており、同一地点を解像度 1m なら三日、解像度 3m なら 1 日の周期で撮影することが可能であり、定期的なデータ更新も十分に可能で

ある。そのため、建物インベントリーの定期的な更新も可能である。IKONOS には 4 バンドのセンサーが搭載されており、赤、緑、青、近赤外線波長の波長帯を捉える。赤、緑、青、近赤外線波長のバンドを以下では、red, grn, blu, nir と略記する。それぞれのバンドが捉える波の強さは 0 から 2047 の 2048 階調の DN 値で表現されている。これらの非常に豊富なデータ量は詳細な土地被覆の分析を可能とすると考えた。

8.2.3. GPS ビデオカメラについて

GPS ビデオカメラは情報通信研究機構 宇治 GIS 研究開発支援センターが開発したシステムである。ビデオを撮影する際に、緯度経度情報をビデオの音声情報に変換して取り込み、GIS 上で位置情報付きでビデオ映像を表示する機能を持っている。この機能を用いて、予め設定された撮影地に赴き、現地において車中から撮影した家並みの映像情報とその緯度経度座標を IKONOS 画像を背景図とした GIS 上で解析し、どこにどのような建物種別を持つ建物が何棟存在するのかを、短時間で調査することに利用した。

8.2.4. 研究対象地・研究手法

研究の対象地については、市中央に南北に大きな断層が走るフィリピンのメトロマニラ圏の都市であるマリキナ市⁽¹⁾(図 8-1)とした。

次に、本来、建物インベントリーを作成する際には、GIS 上に建物ポリゴンデータを作成し、それを解析することが効果的である。しかし、そのためには非常に多くの費用を要する。例えば、三浦・翠川は IKONOS 画像を既存の建物ポリゴンデータの更新に利用する研究を行っているが、ポリゴンデータが全く存在しない状況から IKONOS 画像データから建物ポリゴンデータを作成する手法は確立されていない。そこで、本研究では、衛星 IKONOS を用い、まず、適当な大きさのグリッドサイズで土地被覆を分類した。その後、GPS ビデオカメラを用い現地調査を行い、建物棟数・種別を調査した。最後に、土地被覆分類ごとに建物棟数・種別を平均化し、その関係を用いて対象地であるマリキナ市全域の建物棟数・種別を推定することを行った。また、建物インベントリーを現地調査において作成する手法に関しては、例えば、大角らがネパールのカトマンズにおいて行った研究が存在する。それは全体のうちの 0.4% のサンプルを層化多段階抽出法によって抽出し、建物構造の聞き取り調査、建物状況の目視調査、調査対象物の形状の測定などを行い、そのデータを用いて建物被害想定を行っている。そこでは、100 名以上の調査員を動員し、また、調査全てには 3 ヶ月を要している。時間、費用といった資源を気にしないならば、この種の調査において高い精度の建物インベントリーが得られると考えられる。しかし、例えば、途上国における防災対策を行う際などに、起こりうる被害の概要を把握する際には、そこまでの精度は必要とされない状況が多く存在する。我々の研究の目的とするところは、短期間に、経済的、簡易に建物インベントリーを作成する手法を提示することで、途上国の防災力向上に寄することである。本研究では、現地調査においては、GPS ビデオカメラを用いて家並みを撮影することであり、必要な時間は 7 日間、調査員は二人であるので、研究の目的を満たすことができていると考えている。

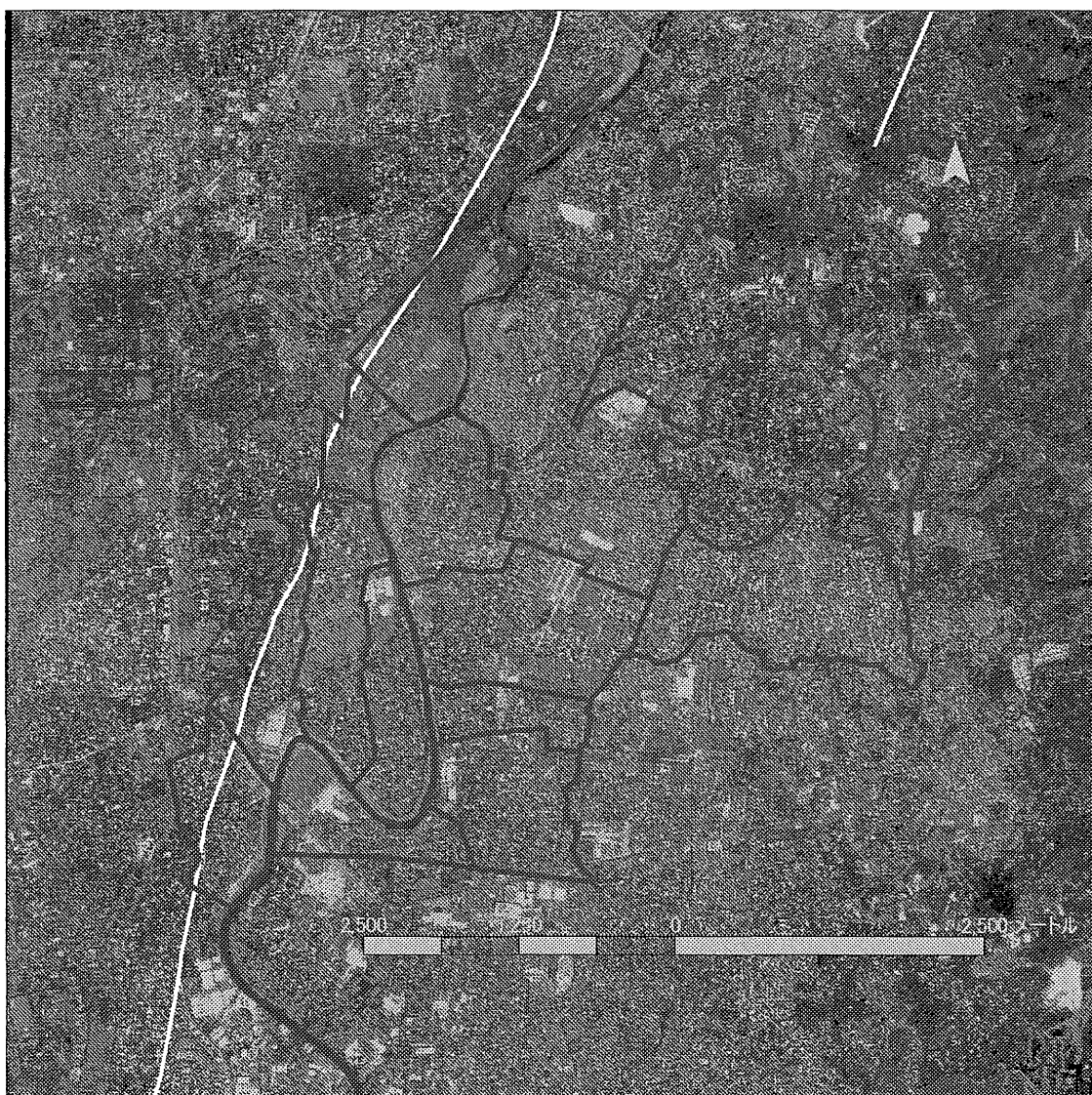


図8-1 マリキナ市におけるIKONOS

8.3. クラスター分析による土地被覆分類

8.3.1. 解析のための最適なグリッドサイズの決定

本研究においては、まず、衛星画像のクラスター分析による土地被覆分類とその分類されたカテゴリーごとの建物棟数の間に関連性があると考えた。また、建物棟数・種別を評価することが目的であり、その際、ある一定の大きさを持ったグリッドにおける建物郡として評価を行うことを考えた。まず、わが国の住宅密集度をみると、岡田らが関西の住宅地を例に 1ha あたりの住宅密集度を以下の表 8-1 のようにまとめている。この表から明らかに 10m グリッドではデータのばらつきに大きな制約があるため、精度を考慮すると 25m グリッドが妥当であることを示唆している。これに基づいて、フィリピンのマリキナ市の衛星画像を目視分析したところ、25m 以下のグリッドには収まり切らない建物が多く見られた。また、簡易にサンプルをとったところ、例えば 10m グリッドで平均すると、建物では 0.7 棟以下、その他のエリアでは、0.2 棟以下であった。建物郡として評価を行うために、クラスター分析をする際に、一辺 25m, 50m, 100m, 200m の四種類のグリッドサイズでそれぞれ分析を行い、それらの中で最も建物棟数の推定精度が高いと考えられるものに決定することとした。

8.3.2. ラーニングエリアの選定

対象地であるマリキナ市において、マリキナ市全域における土地被覆を有すると考えられる、土地被覆の多様な地域を抽出し、ラーニングエリア(図 8-2)として選定した。この地域を対象にクラスター分析による土地被覆分類と分類されたカテゴリーごとの建物棟数の分布を分析した。

8.3.3. クラスター分析による土地被覆分類

上記のラーニングエリアにおいて、まず、25m を単位とするセルであれば、一つのグリッドに対して 625 のピクセルが存在し、それぞれが red, grn, blu, nir の 4 バンドの DN 値のデータを持ち、4 バンドのデータの分布として表現できる。この 4 バンドのデータの分布を用いて、ラーニングエリアにおける全てのセルをクラスター分析によって分類し、デンドログラムを作成した。また、DN 値の一つ一つの分布が 0 から 2047 の範囲をとっている。このままクラスター分析を行うと、データの幅が広く、甚大な時間を必要とする。そのため、0 から 2047 の範囲を 64 ごとに幅をとって分割し、0 から 31 までの 32 段階の値をとるように変換した。デンドログラムのそれぞれの段階の分類ごとに衛星画像を目視分析し、建物棟数を評価することに最も適していると考えられる分類を決定した。分類結果を示すデンドログラムとラーニングエリアの図を図 8-3, 4 に示す。

上記の一連の土地被覆分類を 50m, 100m, 200m のグリッドサイズにおいても同様に行った。結果としては、25m のグリッドサイズにおいては、川、緑地、裸地、工場、戸建住宅地 A、戸建住宅地 B、密集住宅地の 7 カテゴリーに分類され、50m, 100m, 200m に関しては、これに川岸を加えた 8 カテゴリーに分類された。25m においては、グリッドがより小さくなっているため、50m 以上のグリッドにおいて川岸と判定されたグリッドが裸地のグリッドと川のグリッドに分かれ、川岸のカテゴリーが無くなったと考えられる。

表8-1 住宅密集度の分布

グリッドサイズ (m)	100	50	25	10
一戸建て住宅地				
六麓荘	5.6	1.4	0.4	0.1
帝塚山	28.0	7.0	1.8	0.3
低層団地				
東住吉区山坂町	71.0	17.8	4.4	0.7
町屋・長屋地区				
住吉区万代	95.0	23.8	5.9	1.0
木賃アパート地区				
豊中市庄内幸町	255.0	63.8	15.9	2.6
西成区太子	400.0	100.0	25.0	4.0
高層団地				
住之江区趣住吉団地	248.0	62.0	15.5	2.5
城東区森之宮団地	283.0	70.8	17.7	2.8

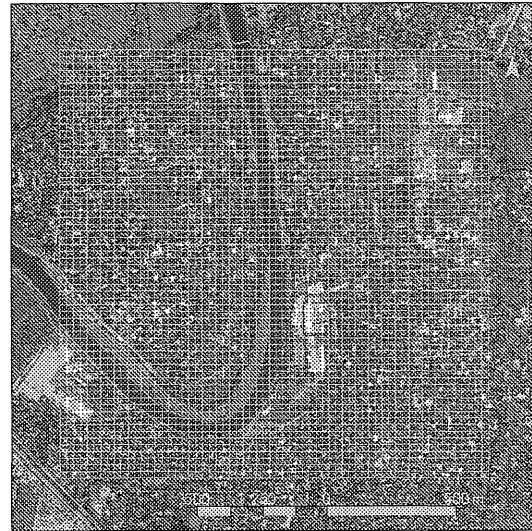


図8-2 ラーニングエリア

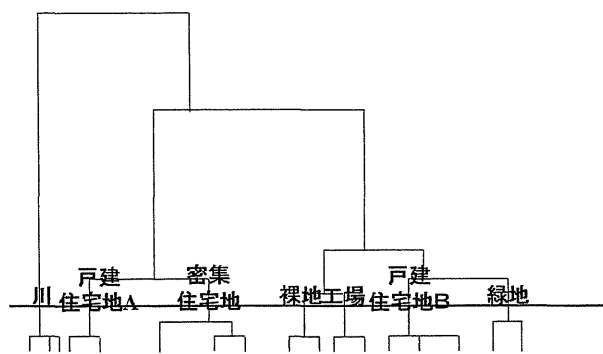


図3 クラスター分類による
デンドログラム

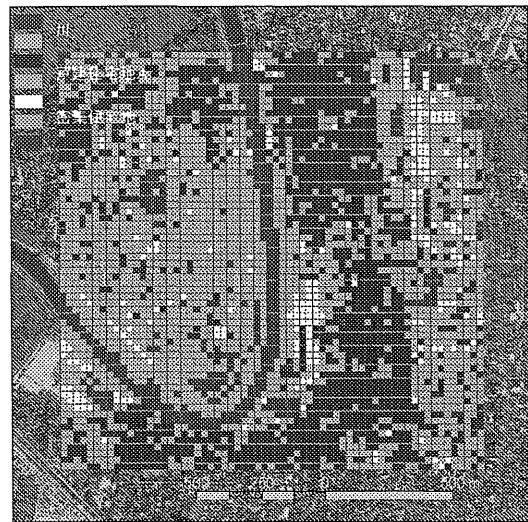


図4 ラーニングエリアの分類結果

8.3.4. 土地被覆分類と建物棟数分布の関係分析

幸いなことにマリキナ市域のほぼ3/4についてはNAMRIAが1995年に作成した建物ポリゴンデータが存在している。そこでNAMRIAデータを利用して、まず、25mのグリッドサイズにおいて、7つの土地被覆カテゴリーについて1グリッド当りの建物棟数の分布(図8-5)と平均棟数を検討した。

川と分類した土地被覆カテゴリー1はほとんどのセルにおいて建物が0棟である。また、1セル当りの平均棟数が0.06棟と非常に少ない。裸地と分類したカテゴリー4においては建物が1棟も存在しないセルが過半数を超えている。また、1セル当りの平均棟数も0.4棟と少ない。緑地と分類したカテゴリー7は、ほとんどのセルにおいて建物が0棟であり、平均棟数も0.14棟と非常に少ない。

工場と分類したカテゴリー5においては1棟も存在しないセルが最も多く、平均棟数としては、0.74棟である。

戸建住宅地Aと分類したカテゴリー2においては建物1棟以上存在するセルが過半数を超えている。また、1セル当りの平均棟数も1.08棟となっている。

戸建住宅地Bと分類したカテゴリー6は建物が1棟以上存在するセルが過半数を超え、また平均棟数も1.18棟とカテゴリー2の戸建住宅Aと類似した分布を示している。

密集住宅地と分類したカテゴリー3においては建物が2棟以上存在するセルが過半数を超えている。また、1セル当りの平均棟数もカテゴリー3の倍以上で2.52棟となっている。

上記のように、衛星画像のクラスター分析による土地被覆分類に対して、カテゴリーごとの建物棟数が非常に即した形で分布していることが明らかとなった。また、50m、100m、200mのグリッドサイズにおいても同様の分析を行い、それらにおいても同様の結果が得られている。四種類のグリッドサイズのカテゴリーごとの建物棟数の平均と分散を表8-2に示した。

8.3.5. 最適なグリッドサイズの決定

四種類のグリッドサイズについて土地被覆カテゴリーごとの建物棟数の分散を比較すると、25mのグリッドサイズにおいて、川と分類したカテゴリー以外の全てのカテゴリーにおける分散が最も低かった。最も分散が低いということは、最も平均からの建物棟数のばらつきが少ないため、25mのグリッドサイズにおける土地被覆分類が、建物の棟数に従って最も的確に分類できていると考えた。この後、対象地全域の建物棟数の推定を行うこととなるが、その際、推定建物棟数の真の値からのばらつきは最も小さくあるべきである。そのため、25mのグリッドサイズが建物棟数の推定を最も精度高く行うことができると考えた。また、マリキナ市でもっとも住宅密集度が高いエリアは河川敷を不法に占拠していた低所得者層に提供した再定住住宅地域である。この地域の建物は間口4m奥行き8mで規格化されている。25mグリッドサイズを採用した場合にも、最大20棟までの分散を得ることが可能であり、25mグリッドの採用が妥当であるといえる。

以上の諸点を考慮して、衛星画像をクラスター分析し、土地被覆分類を行うことで建物の棟数を評価しようとする場合、25mグリッドを単位に実施することが最適であると結論付けた。今後の分析においては、25mグリッドを単位とするため、土地被覆分類カテゴリーとしては、川、緑地、裸地、工場、戸建住宅地A、戸建住宅地B、密集住宅地、の7つを用いることとした。

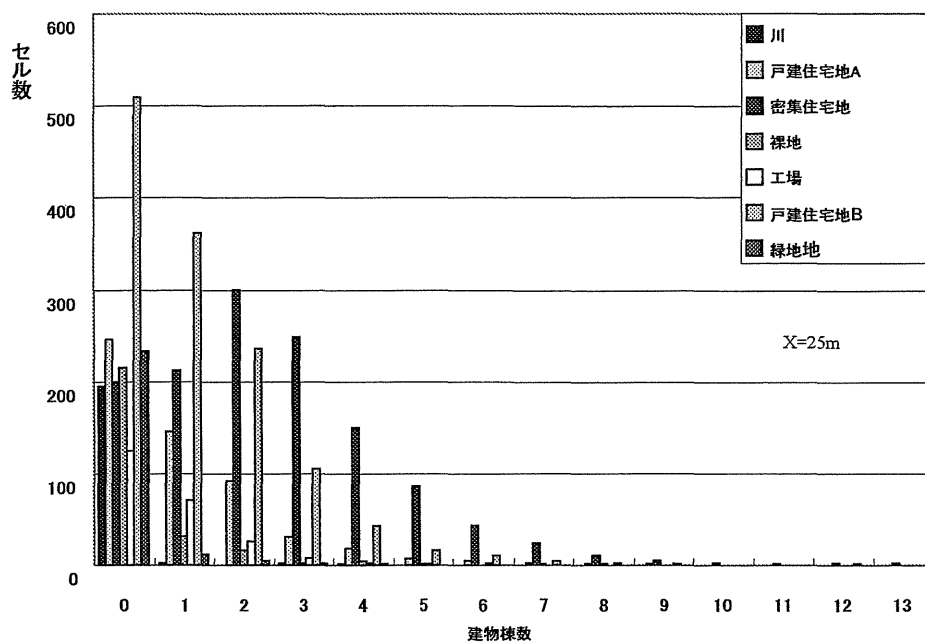


図8-5 カテゴリーごとの建物棟

表8-2 グリッドサイズごとの建物棟数平均・分散

カテゴリー		川	川岸	緑地	裸地	工場	戸建住宅地A	戸建住宅地B	密集住宅地
25m	平均	0.06	/	0.14	0.39	0.74	1.08	1.18	2.52
	標準偏差	0.42	/	0.53	1.01	1.04	1.08	1.38	1.97
50m	平均	0.08	0.76	1.25	0.97	2.08	5.27	5.47	10.86
	標準偏差	0.36	2.92	1.77	3.18	1.98	3.37	4.03	5.83
100m	平均	5.64	11.56	4.13	7.09	5.00	15.33	23.43	40.15
	標準偏差	9.22	16.55	3.46	6.52	3.12	6.54	12.34	17.77
200m	平均	25.67	64.17	26.00	38.89	43.50	96.80	62.33	157.20
	標準偏差	19.77	34.34	18.38	23.68	10.61	44.27	19.21	49.41

8.4. マリキナ市全域の土地被覆・建物棟数の推定

8.4.1. マリキナ市全域の土地被覆の推定

マリキナ市における土地被覆を 25m グリッドで推定する際、ラーニングエリアで得た 7 つの土地被覆分類カテゴリーを基準として、当該グリッドの DN 値の分布がユークリッド空間上で最も近似しているものを当該グリッドの土地被覆と推定することとした。そこで、まず、25m のグリッドサイズにおいて、ラーニングエリアで、7 つのカテゴリーごとに、DN 値の分布の平均をとった。DN 値の分布の平均と現地調査の際に撮影したカテゴリーごとの土地被覆を示す画像を図 8-6 に表した。前述にもしたが、DN 値は 0 から 31 までの分布をとっている。これらのカテゴリーごとの 1 セル当りの DN 値の分布の平均を

$$S_{(x,m,n)} \quad (1 \leq x \leq 7, 1 \leq m \leq 4, 0 \leq n \leq 31) \quad [1]$$

と表現する。x はカテゴリーの 7 種類、m は blu, red, grn, nir の 4 バンドの 4 種類、n は DN 値の 32 段階を表す。また、マリキナ市全域において、それぞれ 25m のグリッドごとに DN 値の分布を求めた。マリキナ市におけるあるセルを A とした場合、そのセルの持つ DN 値の分布を

$$A_{(m,n)} \quad (1 \leq m \leq 4, 0 \leq n \leq 31) \quad [2]$$

と表現する。ここで、

$$\sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^{31} (S_{(x,m,n)} - A_{(m,n)})^2 \quad [3]$$

を x=1 から 7 まで個別求め、その中で、上記の差異の平方和が最小の値をとる x をグリッド A の土地被覆分類とした。この手順でマリキナ市全域のセルの土地被覆を推定した結果が図 8-7 である。

8.4.2. ラーニングエリアにおける建物ポリゴンデータを用いたマリキナ市全域の建物棟数の推定

マリキナ市全域の土地被覆を推定する際、8.3.4.で得た 25m グリッドによる土地被覆カテゴリーごとの建物棟数の平均値を、それぞれのグリッドに存在する建物棟数の推定値とした(表 8-3)。また、マリキナ市を①、②、③、④の 4 つの地域に分割した場合(図 8-8)、マリキナ市における NAMRIA の建物ポリゴンデータにおいて、①の部分においてデータが欠損している。建物ポリゴンデータが存在する②、③、④の 3 地域においては、建物ポリゴンデータから算出される建物棟数と、対応する地域について本研究で提唱した建物インベントリー推定法の結果を比較することで推定の精度の検証が可能になる。表 8-4 は、各地域ごとに、土地被覆カテゴリーごとのセル数の推定値と、そこに土地被覆カテゴリーごとの平均建物棟数を乗じた建物棟数の推定値、さらに対応する地域に存在する建物ポリゴン総数、および誤差率を表した。誤差率は以下のように表現した。

$$\text{誤差率} = 100 \times (\text{建物ポリゴン総数} - \text{建物棟数推定値}) / \text{建物ポリゴン総数}$$

表 8-4 の結果を見ると、②、④の地域の密集住宅地が最も誤差率が高い。しかし、②、④の地域の建物棟数推定値の合計値 19373.42、16194.59 と比べるとその棟数の 1355.76、

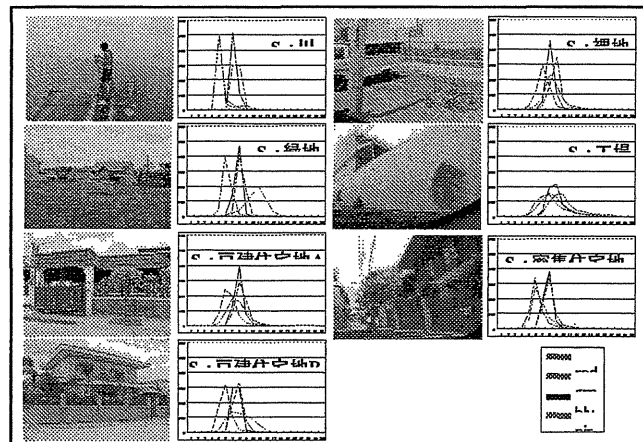


図8-6 カテゴリーごとの写真とDN値の平均値

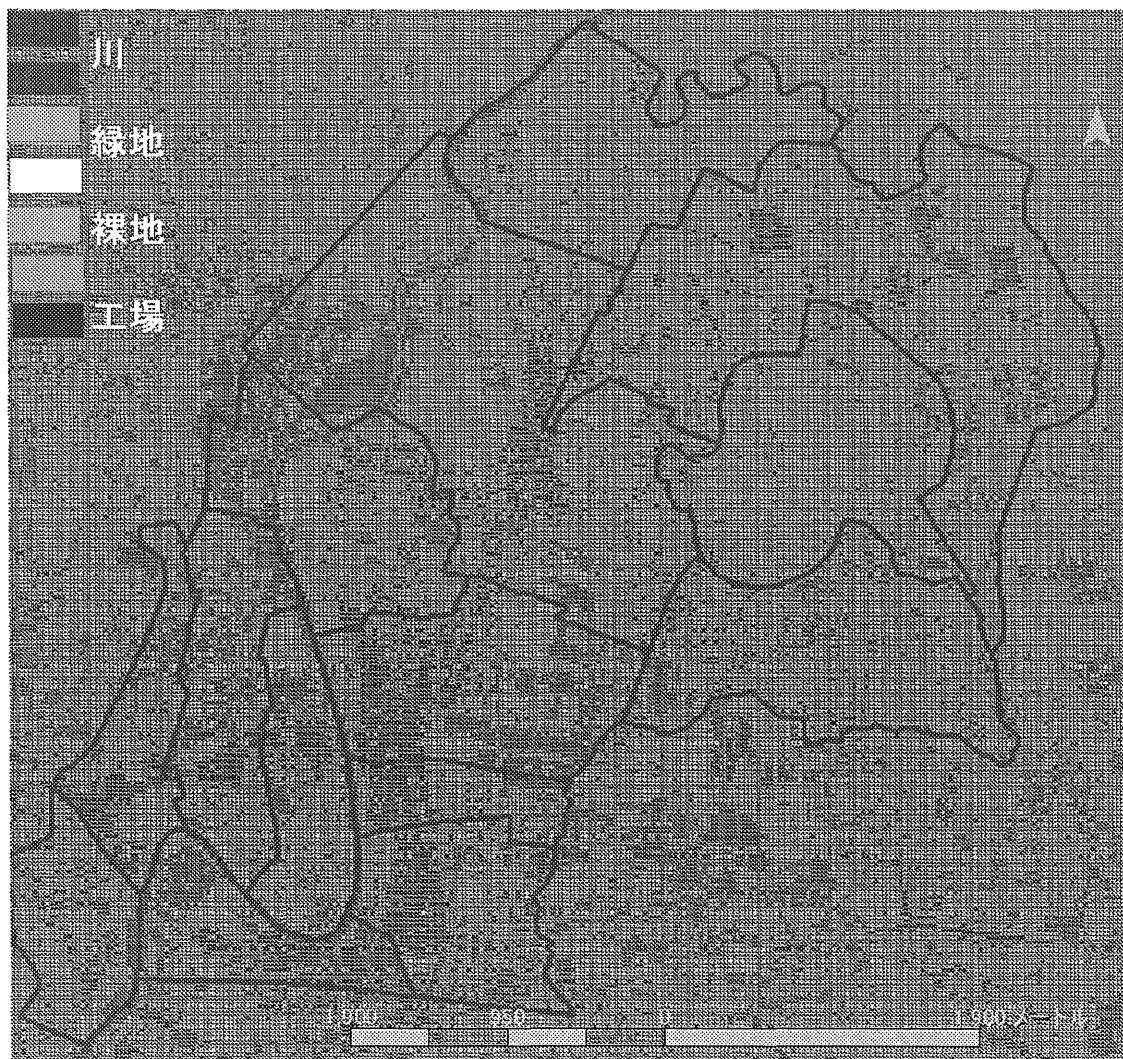


図8-7 マリキナ市全域の土地被覆推定結果

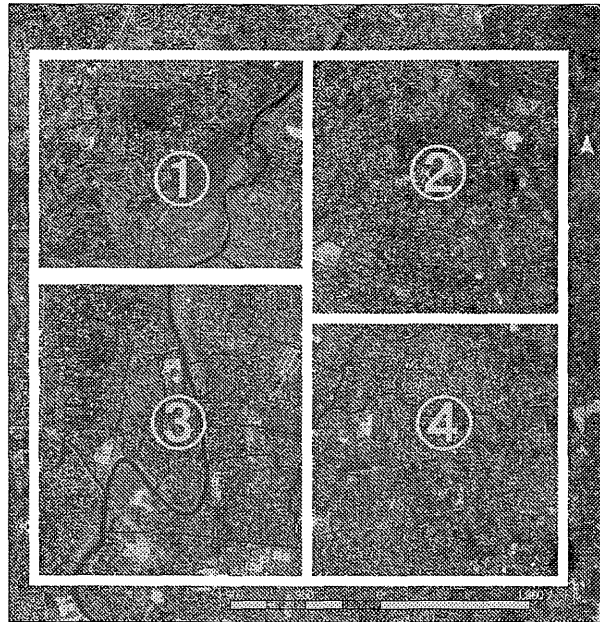


図 8-8 マリキナ市四地域分割

表8-3 カテゴリーごとの平均建物棟数

カテゴリー	川	緑地	裸地	工場	戸建住宅地A	戸建住宅地B	密集住宅地
建物棟数／1セル	0.06	0.14	0.39	0.74	1.08	1.18	2.52

表8-4 マリキナ市建物棟数推定値

カテゴリー	平均建物棟数	②				③				④			
		セル数	建物棟数 推定値	建物ポリゴン 総数	誤差率	セル数	建物棟数 推定値	建物ポリゴン 総数	誤差率	セル数	建物棟数 推定値	建物ポリゴン 総数	誤差率
川	0.06	359	21.54	27.00	20.22	524	31.44	23.00	-36.70	126	7.56	84.00	91.00
緑地	0.14	449	62.86	62.00	-1.39	2465	345.10	263.00	-31.22	2583	361.62	414.00	12.65
裸地	0.39	510	198.90	644.00	69.11	1959	764.01	1175.00	34.98	1191	464.49	641.00	27.54
工場	0.74	702	519.48	361.00	-43.90	1949	1442.26	1632.00	11.63	1008	745.92	664.00	-12.34
戸建住宅地A	1.08	12710	13726.80	8263.00	-66.12	4828	5214.24	3027.00	-72.26	5726	6184.08	4000.00	-54.60
戸建住宅地B	1.18	2956	3488.08	3626.00	3.80	5735	6767.30	9174.00	26.23	5966	7039.88	6821.00	-3.21
密集住宅地	2.52	538	1355.76	644.00	-110.52	3516	8860.32	8633.00	-2.63	552	1391.04	626.00	-122.21
合計値	／	18224	19373.42	13627.00	-42.17	20976	23424.67	23927.00	2.10	17152	16194.59	13250.00	-22.22

1391.04 はそれぞれ 10%に満たないため、その誤差の大きさは大きな問題ではないと考えた。また、②、③、④の地域全てにおいて、戸建住宅 A の誤差率が大きいがこれに関しては、今後の課題として精度を向上させていく必要がある。②、③、④の 3 地域の建物棟数の合計は、推定値が 58992.68 棟、実際の棟数が 50346 棟となっており、高い精度が得られていると判断した。

8.4.3.ラーニングエリアにおける現地調査に基づいたマリキナ市全域の建物棟数推定

a)GPS ビデオカメラによる現地調査

マリキナ市の場合には幸運にも市域の 3/4 の地域で建物ポリゴンデータが存在し、建物棟数の推定法の精度確認を容易にしている。しかし、本研究が対象とする途上国では建物ポリゴンデータがまったく存在していない地域のほうがはるかに多い。そうした状況においては、現地調査を通して、建物種別や建物棟数を推定する方法を構築する必要がある。

本節では、本研究が用いた現地調査による推定法の概要について記述する。ラーニングエリアにおいて、7 種類の土地被覆カテゴリのすべてを含む調査対象地域を選定する。調査効率という観点からはできるだけ隣接した地域を選定することがのぞましい。推定精度を考慮すると、各カテゴリに関して出来るだけ多くのグリッドを調査対象に含めることがのぞましい。上記の 2 つを考慮した結果選定された調査対象地として、図 8-9 に示された 8 地域、計 196 グリッドに選定した。現地調査は 2003 年 11 月 21 日に GPS ビデオカメラを用いて、約三時間で撮影を行った。撮影方法としては車内にビデオカメラを設置し、車の進行方向と約 45 度の角度を持たせ、時速 10km 程度の速さで車を進めながら撮影を行った。

b)映像データと衛星画像を用いたグリッド単位の建物棟数の分析

GPS ビデオカメラによって得られた映像データを IKONOS 衛星画像を背景とした GIS 上で、位置情報を確認しながら、GESI 法で用いられる建物種別推定法を用いて、1 棟ごとに建物種別を検討し、調査対象グリッドの建物棟数を分析した。まず、衛星画像からおおよその建物の存在を確認し、その上で GPS と連動した映像データからその位置と存在を確定した。調査対象セルの建物棟数をカテゴリごとに平均棟数を算出したものが表 8-5 である。

ラーニングエリアにおいて建物ポリゴンデータを用いて得たカテゴリごとの平均棟数と比較した。川と判定された土地被覆カテゴリと緑地と判定された土地被覆カテゴリに関しては、それらのセルに建物が存在しなかったため、平均棟数が 0 となってしまっている。建物が存在する工場、住宅地、密集住宅地と判定された 5 種類の土地被覆カテゴリでは、推定値と非常に近似した値をとっている。本研究においては、建物棟数・種別の推定を目的としており、建物の大部分が存在する 5 つのカテゴリにおいて、平均棟数が満足できる精度で得られていると考えた。そのため、次に、現地調査による結果を用いて、対象地全域の建物棟数の推定を行った。

c)平均建物棟数による対象地全域の建物棟数推定

現地調査で得られたグリッドごとの平均建物棟数をもとに、8.4.2.と同様のやり方でマリキナ市全域の建物棟数を推定し、建物ポリゴンデータが存在する地域ではその精度を検証した結果を表 8-6 に示す。表 8-5 で示すカテゴリごとの平均建物棟数が 8.4.2.と近い値をとっていることから、誤差率においても近い結果が得られている。②、③、④の 3 地域の建物棟数の合計は、推定値が 58614.77 棟、実際の棟数が 50346 棟となっており、現地調査を利用した推定においても高い精度が得られていると判断した。

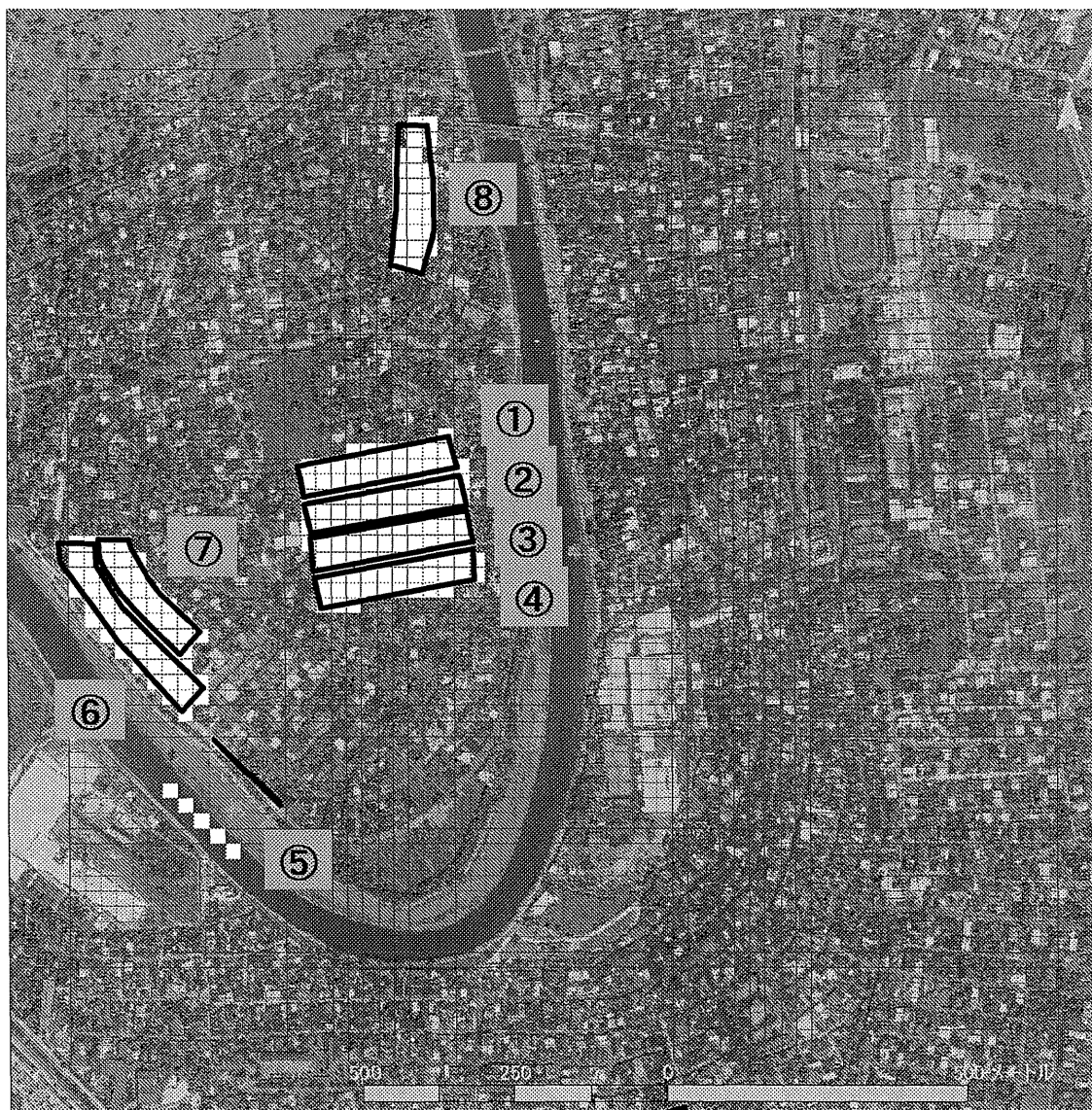


図 8-9 調査対象地

表8-5 現地調査から得たカテゴリーごとの平均建物棟数

カテゴリー	川	緑地	裸地	工場	戸建住宅地A	戸建住宅地B	密集住宅地
建物棟数/1セル	0	0	0.60	0.57	1.17	1.08	2.45

表8-6 現地調査を用いたマリキナ市建物棟数推定値

カテゴリー	平均建物棟数	②				③				④			
		セル数	建物棟数	建物ポリゴン	総数	セル数	建物棟数	建物ポリゴン	総数	セル数	建物棟数	建物ポリゴン	総数
川	0	359	0	27.00	—	524	0	23.00	—	126	0.00	84.00	—
緑地	0	449	0	62.00	—	2465	0	263.00	—	2583	0.00	414.00	—
裸地	0.60	510	306.00	644.00	52.48	1959	1175.40	1175.00	-0.03	1191	714.60	641.00	-11.48
工場	0.57	702	400.14	361.00	-10.84	1949	1110.93	1632.00	31.93	1008	574.56	664.00	13.47
戸建住宅地A	1.17	12710	14870.70	8263.00	-79.97	4828	5648.76	3027.00	-86.61	5726	6699.42	4000.00	-67.49
戸建住宅地B	1.08	2956	3192.48	3626.00	11.96	5735	6193.80	9174.00	32.49	5966	6443.28	6821.00	5.54
密集住宅地	2.45	538	1318.10	644.00	-104.67	3516	8614.20	8633.00	0.22	552	1352.40	626.00	-116.04
合計値	—	18224	20087.42	13627.00	-47.41	20976	22743.09	23927.00	4.95	17152	15784.26	13250.00	-19.13

8.5. 現地調査による建物種別の推定結果

8.5.1. 現地調査による GESI の基準に従った建物種別判定

8.4.3.において建物棟数を調査する際に撮影した GPS と連動した映像データを用いて GESI の基準に沿って建物種別の判定を行った。8.4.3.で分析を行った建物のうち、可能な建物に関して判定を行った。まず第一に、その Building Types(構造)を GESI 法にもとづいて判定した(表 8-7)。その結果、調査地域の建物は全て R/C, steel infill と判定された。第二に、表 8-8 に従って、調査の対象となった建物を一棟ごとに、GESI 法にもとづいて design(設計)・construction(施工)・materials(材料)の 3 側面について、建築の質を判定した。design・construction に関しては 4 段階、materials に関しては 2 段階でそれぞれ評価を行った。design・construction・materials の評価点の合計を求め、表 8-7 において個々の建物がどの Vulnerability Curve に属するかを求め、これを建物種別とした。ここでは、アルファベットにおいて、より早いものがより耐震性が高いものとなっている。また、長谷川らはマリキナ市における市役所、病院、学校など主要施設を対象として GESI の建物種別を行っている。今回、住宅を主とする建物の種別判定を行う際に、その研究を参考とし、またその研究のメンバーでもあり、建築構造の専門家とともに、まず、Building Types(構造)を決定し、design(設計)・construction(施工)・materials(材料)の 3 側面についてそれぞれ 4, 4, 2 段階に判定を行い、最終的に建物の種別判定を行った。

被害想定を行う際は、図 8-10 に従い、Vulnerability Curve が決定されれば、その地域を襲う地震外力を PGA で与えることで、None, slight or moderate, Extensive, Partial collapse, Complete collapse の 4 段階で被害状況(表 8-9)を決定することができる。

8.5.2. 土地被覆分類ごとの建物種別の決定

8.5.1.の調査の結果を、土地被覆のカテゴリーごとに調査を行った全ての建物を集計したものが図 8-11 である。図 8-11 を見ると、まず、裸地、工場における建物も 3 棟、2 棟とサンプルとするには非常に少なくなっているが、どちらも Vulnerability Curve は C か D と耐震性が比較的に高めであった。戸建住宅 A については全 28 棟のうち最も多い 15 棟が D と判定され、4 棟が C、6 棟が E、2 棟が G と判定されている。戸建住宅 B に関しては、全 42 棟のうち最も多い 31 棟が D と判定され、5 棟が C、4 棟が E、1 棟が F、1 棟が G と判定されている。密集住宅地においては、最も多い 9 棟が E と判定され、8 棟が D、6 棟が F、3 棟が G、1 棟が C と判定されている。

戸建住宅地 A、B と密集住宅地のカテゴリーの GESI の判定の結果を比較すると、戸建住宅 A、B に関しては、比較的耐震性の高い D にその建物棟数の多くが判定され、密集住宅地に関しては、それよりも耐震性の低い E と判定されたものが最も多く、また E、F、G の中に判定されたものも戸建住宅 A、B に比べ多い。したがって、土地被覆分類におけるカテゴリーと GESI の Vulnerability Curve の判定による耐震性の評価に高い相関があることが明らかとなった。

8.5.3. 対象地全域の建物棟数・種別推定

8.5.2.の結果を用いて、GESI の Vulnerability Curve の建物の種別判定を加えて、ラーニングエリアで建物棟数・種別を調査した場合に、マリキナ市全体の建物棟数を推定した結果

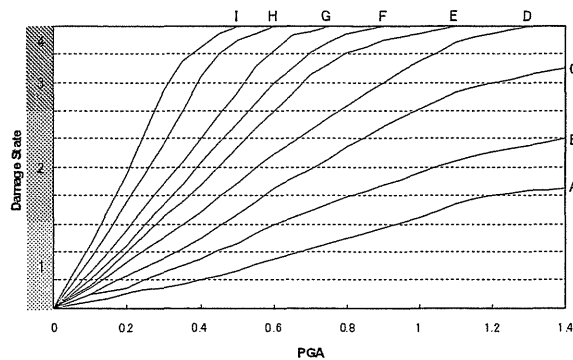


図8-10 GESI Vulnerability Curve

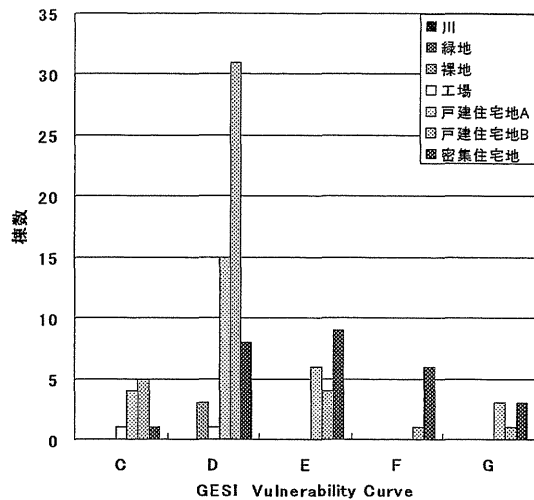


図8-11 カテゴリーごとの建物種別

表 8-7 GESI 建物種別判定

Building Types	0	1	2	3	4	5	6	7
Wood	A	A	B	B	C	C	C	D
Steel	A	B	C	C	D	D	E	F
R/C	B	C	D	E	E	F	G	H
R/C, steel with masonry fill walls	C	D	D	E	E	F	G	H
Reinforced masonry	C	D	D	E	E	F	F	F
Unreinforced masonry	E	E	F	F	G	G	G	H
Adobe	N/A	N/A	G	H	H	H	H	I
Stone rubble	N/A	N/A	G	H	H	H	H	I
Lightweight shack	N/A	N/A	N/A	H	H	H	H	I

表 8-8 GESI 建築の質の判定

Quality of design	
0	Engineered with seismic design
1	Engineered without seismic design, or non-engineered using seismic resistant rules of thumb (e.g. lintel band for masonry)
2	Non-engineered, no seismic resistant elements, good proportions (short, wide, symmetric)
3	Non-engineered, no seismic resistant elements, poor proportions (tall, narrow, no-symmetric)
Quality of construction	
0	Excellent quality, effective supervision of seismic elements of
1	Good quality, some supervision of seismic elements of construction
2	Moderate quality, no supervision of seismic elements of construction but skilled workers
3	Poor quality, no supervision and unskilled workers
Quality of materials	
0	Good quality materials
1	Poor quality materials, or poor maintenance of building

表 8-9 GESI の被害度判定

Damage State	Description
4 Complete Collapse	Building is entirely destroyed, with significant portions of the building collapsed.
3 Partial Collapse	Building is entirely structurally compromised and on the verge of collapse or small portions of the building have collapsed.
2 Extensive	Extensive structural and non-structural damage. Localized life-threatening situations are common.
1 None, Slight or Moderate	Ranging from no damage to non-structural damage and minor structural damage.

表8-10 マリキナ市建物棟数・種別推定結果

カテゴリー	建物棟数/1セル	セル数 推定値	建物棟数 推定値	GESI Vulnerability Curve
川	0	1340	0.0	/
緑地	0	7366	0.0	/
裸地	0.60	4834	2900.40	D
工場	0.57	4376	2500.57	D
戸建住宅地B	1.08	17153	18565.60	D
戸建住宅地A	1.17	31595	36960.19	D
密集住宅地	2.45	5144	12626.18	F
合計	/	71808	73552.94	/

を表 8-10 に示した。その際、戸建住宅 A, B に関しては、GESI の Vulnerability Curve が D と判定されたものが過半数を超えているため、そこに存在する建物は D であると設定した。次に、密集住宅地に関しては、最も多い 9 棟が E と判定され、8 棟が D, 6 棟が F, 3 棟が G, 1 棟が C と判定されている。被害想定では、推定を安全側に行うことが通例であるので、本研究では密集住宅地においては、F と設定した。最後に、裸地、工場においては判定された建物が少ないがともに D と設定した。図 8-12 に実際に戸建住宅 A, 密集住宅地に存在し、それぞれ D, F と判定された建物を示した。

8.6. 建物インベントリー推定手法の提案

8.6.1. GESI 法にもとづく被害想定のための建物インベントリー作成手法の提案

これまでの議論をまとめた本研究における結論として、GESI 法による被害想定を行うために必要となる以下のような建物インベントリー作成フローを提案した(図 8-13)。

- 0)対象地の建物インベントリーの整備状況を調査することから始める。対象地に建物ポリゴンデータが存在し、そこに建物種別データが含まれているなら、被害想定を行うことが可能であるので、作業はそこで終了である。建物ポリゴンデータは存在するが種別データが含まれていないか、建物ポリゴンデータが全く存在しない場合には、
 - 1)対象地の IKONOS 画像を購入する。
 - 2)対象地の地震動分布データを入手し、その最小グリッドサイズ(X)を調べる。
 - 3)対象地の IKONOS 画像を X を整数倍で割った値で 25 以上、50 以下のもののうち最小の値の大きさに切り分ける。この意味は、分析に用いるグリッドの大きさを、まず、地震動分布データに合わせる必要がある、地震動分布データの最小グリッドの大きさの整数倍である必要がある。次に、8.3.5.で、25m 以下では、建物がグリッドの中に一棟も入らず、データのばらつきにも制約があるので 25m 以上である必要がある。また、25m, 50m, 100m, 200m の中では、25m を最適とする結果を得ている。これに従い、50m より小さく、25m 以上の大きさに地震動分布データのグリッドの整数倍となる中で最も小さいグリッドサイズで分析を行うこととしている。
 - 4)IKONOS 画像を目視で分析し、対象地全域の土地被覆を有していると考えられる地域を割り出し、ラーニングエリアとして選定する。現地調査はこのラーニングエリアにおいて行うこととなる。
 - 5)ラーニングエリアを、IKONOS 画像を DN 値の分布に従い、クラスター分析により分類する。この後下記の 6),7)の二つの作業に分かれる。
 - 6)建物棟数の推定を行う。

そこで、建物棟数の推定に関しては、建物ポリゴンデータが存在するなら、
 - 6-1)建物ポリゴンデータを用いて、対象地全域の建物棟数を推定する。
建物ポリゴンデータが存在しないなら
 - 6-2)GPS ビデオカメラを用いて、建物棟数を現地調査する。
 - 6-3)ラーニングエリアにおける建物棟数の調査結果から、対象地全域の建物棟数を推定する。

建物種別に関しては、

 - 7)建物種別の推定を行う。

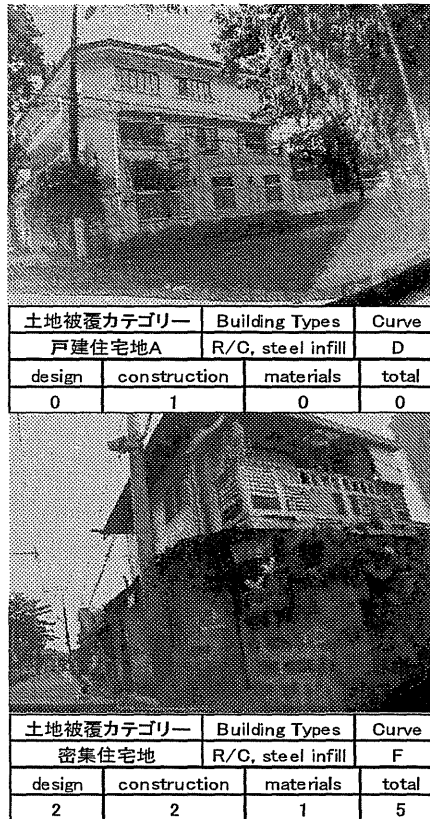


図8-12 GESIによる建物種別判定

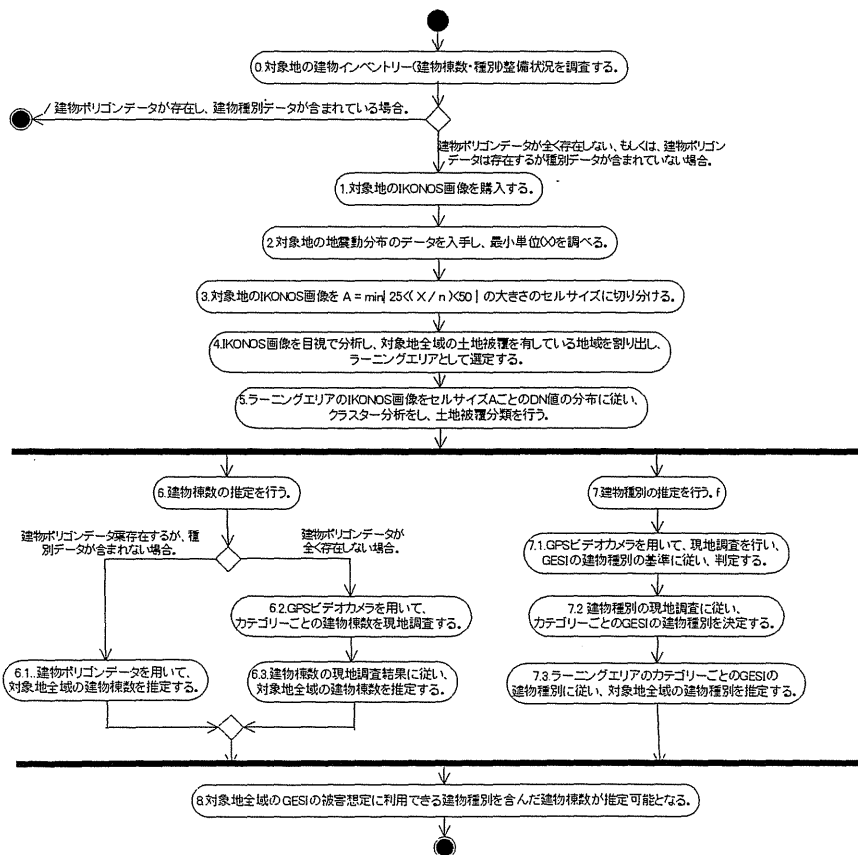


図8-13 建物インベントリ作成フロー

- 7-1)GPS ビデオカメラを用いて現地調査で、GESI の建物種別の基準に従い、判定する。
- 7-2)調査結果を分析し、それぞれの土地被覆分類のカテゴリーに対し、GESI の建物種別を決定する。
- 7-3)ラーニングエリアの土地被覆分類のカテゴリーごとの GESI の建物種別に従い、対象地全域の建物種別の推定を行う。
- 8)このような一連の作業で GESI の被害想定手法に利用できる建物種別を判定した形で対象地の建物棟数が推定可能となる。

8.7. まとめ

本研究においては、まず、衛星 IKONOS の高解像度の衛星画像を特定の大きさのグリッドでクラスター分析により分類することで、建物種別と建物棟数を評価することが可能であると考えた。その結果、建物の棟数を基準とし、効果的な土地被覆分類を行うことができることを示した。また、土地被覆分類は 25m, 50m, 100m, 200m の四種類のグリッドサイズで行い、その中で建物棟数のばらつきの少ない 25m のグリッドサイズが最も的確に建物棟数に従って分類可能であった。また、一般的な住宅の敷地面積を考慮し、同様に、一辺 25m のセルが適当であると結論付けた。

マリキナ市全域において、土地被覆が多様で、マリキナ市全域の土地被覆を有すると考えられるラーニングエリアにおいて、建物ポリゴンデータから土地被覆のカテゴリーごとの平均建物棟数を求め、それを用いて対象地全域の建物棟数を推定し、高い精度を得た。同様に、ラーニングエリアにおいて、GPS ビデオカメラを用いた現地調査から土地被覆のカテゴリーごとの平均建物棟数を求め、対象地全域の建物棟数を推定し、これにおいても高い精度を得た。

GPS ビデオカメラを用いて現地調査を行い、建物の種別を GESI の基準に従って判定した。その結果、土地被覆分類のカテゴリーと GESI の建物種別による耐震性の判定の間に高い相関があることを示した。最後に、各土地被覆のカテゴリーに平均の建物棟数・GESI の建物種別を設定し、マリキナ市全域において推定を行った。

これら一連の結果から途上国において建物インベントリーが存在しないときに、高解像度の衛星画像と GPS ビデオカメラを用いた効果的な建物インベントリー作成手法を開発し、建物インベントリーが存在せず、被害想定が行えないような地域において、利用可能な建物インベントリーの作成を含めた被害想定の一連の枠組みを提案した。

今後の研究課題としては、まず、ラーニングエリアの選定方法が挙げられる。本研究の建物インベントリーの精度は選定したラーニングエリアによる影響が小さくない。そのため、現在の目視分析から選定するというラーニングエリアの選定方法では、個人の能力にも依存し、毎回、精度が変わる恐れもある。そこで、個人の能力に依存しないようなラーニングエリアの選定方法が求められていると考えた。次に、建物種別の判定精度についてである。今回は、土地被覆のカテゴリーごとに GESI の建物種別を設定し、それをもって対象地全域を推定した。しかし、この推定精度にはまだ分析が及んでいないため、今後進めていくつもりである。今後の研究の方向性としては、現在までに一定の精度が得られているので、IKONOS 衛星画像と GPS ビデオカメラを用いて、途上国で GESI 法にもとづく被害想定を行うための、より短期間で行え、簡易で経済的な手順の開発を進める。

9. まとめ

本研究では、災害発生前後を通して社会システムの状態をモニタリング可能な指標として、米国の軍事気象衛星 DMSP が日々捉える地表面夜間可視画像を利用して、災害前後の各フェーズにおいて必要となる情報を推定する手法を提案・改良を行った。本研究の成果は以下の通りである。

2.では DMSP 時系列画像を用いて早期被災地推定システム (EDES) の精度向上を図った。

3.では、広域地震被害想定に必要な、地震に起因する外力の推定手法と被害ポテンシャル把握手法の現状を整理し、被害ポテンシャル把握手法に求められる要件として、継続的な被害ポテンシャルのモニタリング能力と、都市圏の同定能力の必要性を明らかにした。さらに、DMSP/OLS 夜間可視画像の特性を整理し、DMSP 画像が上記 2 つの要件を満たしうる技術であることを明らかにした。

4.では、DMSP 夜間可視画像を用いた既存の都市光抽出手法の課題を整理し、その課題を克服する手法として、日々観測される大量の DMSP 夜間可視画像を重ね合わせることで、雲、雷、ノイズを除去し、安定した都市光分布モデル (測定論モデル) を作成する手法を提案した。さらに、測定論モデルと既存の都市光分布モデルの 1 つである RCCL の日本国内における都市捕捉率を比較した。その結果、測定論モデルの都市捕捉率は RCCL と同等あるいはそれ以上であることが明らかになった。測定論モデルは、米軍にゲインの操作を依頼することなく、通常の観測の中で得られる画像をもとに、RCCL と同等の都市捕捉率を持つ都市光分布モデルの作成を可能にしており、最新の人口・建物棟数分布をもとにした被害想定を可能にするためのという意味で極めて有用な都市光分布モデルであるといえる。

5.では、1995 年の測定論モデルと、平成 7 年国勢調査メッシュ統計の関係を分析し、DMSP 夜間可視画像を用いて人口規模によって規定される都市圏を同定する手法と人口推定手法を提案した。さらに、平成 7 年国勢調査メッシュ統計、平成 8 年事業所統計メッシュ統計から長谷川・翠川 (1997) の手法に基づき推計された 1995-1996 年の建物棟数と、同時期の測定論モデルの関係を分析し、建物棟数の推定手法を提案した。さらに、異なる機体から撮影された画像を補正する手法を提案した。この補正手法により、観測機体寿命を超えた都市光の時系列分析が可能となった。この補正手法を用いて、1995 年の測定論モデルと 2000 年の測定論モデルにおける都市圏の変化を分析した。また、2000 年時点における人口・建物棟数の推定結果に関して、市区町村単位で精度の検証を行い、その適用範囲を検討した。都市圏同定の際に明らかになった、北関東から福岡に至る巨大レベル 9 都市圏の存在は、南海・東南海地震への備えの重要性を再確認させるとともに、単に、地震外力が及ぶ地域だけでなく、その地域と運命を共にする都市圏全体での被害想定、防災体制の必要性を示した。

6.では、4.で提案した手法では DMSP/OLS センサーのゲインの上限により飽和する傾向にあった都市中心域における都市光強度の違いを把握するため、DMSP 時系列画像データにおける画素単位の観測値分布を考慮してゲインの上限がかなった場合に観測されていたであろう相対的な都市光強度を推定する手法を提案した。

7.では、5.で提案した都市圏同定手法および人口・建物棟数推定手法の適用例として、既存の地震外力推定手法および被害率関数を組み合わせて、日本が最も警戒すべき地震の一つである東海地震が 2000 年に発生した場合の被害想定を行った。

8.では、DMSP 画像を用いた被害想定により大きな被害が発生する地域が明らかとなった際

に、その地域についてより詳細な被害想定を行うためのインベントリーデータを高解像度衛星画像を用いて推定する手法を提案した。

以上のような、提案・改良により災害前後の社会の災害リスク、災害状況をシームレスに把握することが可能となった。これらの手法は、地域特性を考慮した補正は必要となるものの、基本的には社会・経済統計が未整備な地域においても適用可能な手法であり、そのような地域における災害前後の状況把握にこれらの手法が貢献できると考えている。

補注

1. 序論

(1) 被害の「想定」と「推定」の違い

本論文においては、被害の「想定」とは、将来発生するであろう災害による被害を事前に予測することを指す。これに対して、被害の「推定」とは、将来発生するであろう災害による被害や、既に発生しているものの実態がつかみきれない被害を、推測すること全般を指す。別の言い方をすれば、被害の「想定」という場合には、想定の対象となる被害は将来発生するであろうものになるが、被害の「推定」という場合には、推定の対象となる被害は必ずしも将来発生するものであるとは限らない。

2. 自動早期被災地推定システム(EDES)の構築一時系列画像法を用いた推定精度の向上

(1) DMSP/OLS の観測角度

DMSP/OLS の場合、上空約 650 km の軌道からの観測幅 2960 km の走査により、観測角度が 90° から 20° の間で変化する。したがって、観測幅の端部では横から見ているのに近い角度で観測を行っている。

(2) DMSP/OLS の瞬間視野

夜間画像観測時に光電子倍增管 (PMT) による増幅が行われたときの可視～近赤外バンド高分解モードの瞬間視野は 1.74 km、有効瞬間視野は 2.2 km である。衛星鉛直直下から外れると解像力が落ちるため、OLS センサは PMT モードを切り替えて解像力を調節している。この PMT モードの切り替わりのため観測画像の端部では軌道方向のノイズが発生する。

(3) DMSP/OLS 観測画像の平滑化

通常 DMSP 衛星から配信される OLS 観測画像は、衛星上で 0.55 km サンプリング画像の 5×5 ピクセルのデータから 2.7 km サンプリング画像に平滑化されたデータである。データ分解能（解像度）を区別し、0.55 km 分解能は高分解モード (fine mode)、2.7 km 分解能は平滑化モード (smooth mode) と呼ばれる。

(4) DMSP/OLS のゲイン(利得)調整

OLS はアナログの固定値ゲインの前後増幅器と、可変デジタルゲイン増幅器 (VDGA) を持ち、夜間の観測では PMT のゲインがシステム全体のゲインに寄与する。VDGA は地上からのコマンドにより 0 から 63 dB の値に変動可能で、VDGA が 63 dB のときにはシステムゲインは 136 dB に達し、元の光の入力が $10^{13.6}$ 倍に増幅される。DMSP 衛星上で自動制御される基本的なゲイン調整アルゴリズムは基本ゲイン制御 (ASGC) と 2 方向性反射率関数 (BDRF) の 2 種あり、1 ラインの走査の間に 0.4 ms 単位で制御されている。

4. 測定論にもとづく都市光分布モデル作成手法の提案

(1) “日本周辺”の定義

以後、本論文で日本周辺の観測画像という場合、その対象領域は、北緯 $20^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 東経 $122^{\circ} \sim 154^{\circ}$ の範囲内を指す。

(2) 新月期の画像のみから作成される測定論モデルの補正

SIDaB 内に整備されている 1995 年および 1996 年の夜間可視画像は、新月期、すなわち、ゲインが高く設定されている期間に対応するものばかりである。よって、これらの利用可能な画像だけを用いて測定論モデルを作成すると、全期間の観測画像から作成された測定論モデルよりも都市光が強く出てしまう。図 A-1 は、1 年間にわたって比較的データがそろっている 2000 年に関して、新月期のデータのみから作成した測定論モデルと、全期間のデータを用いて作成した測定論モデルを比較したものである。新月期に観測された画像だけで作成された測定論モデルの方が、都市光が強く出ていることが分かる。両者の関係を 2 次関数でモデル化したところ、式 A-1 のような関係が得られた。

$$DN_f = 0.0011 \cdot DN_n^2 + 0.6076 \cdot DN_n + 14.6274 \quad (r^2 = .996) \quad [A-1]$$

ここで、 DN_f : 全期間のデータから作成された測定論モデルの DN 値

DN_n : 新月期のデータから作成された測定論モデルの DN 値

式 A-1 によって、新月期のデータから作成された測定論モデルの都市光強さを、全期間のデータから作成された測定論モデル並みに補正することができる。本論文では、1995 年、1996 年の測定論モデルが、式 A-1 を用いて補正されている。

6. DMSP夜間可視画像における画素単位の観測値分布を考慮した

都市光強度推定手法の改良

(1) $DN=0$ の意味

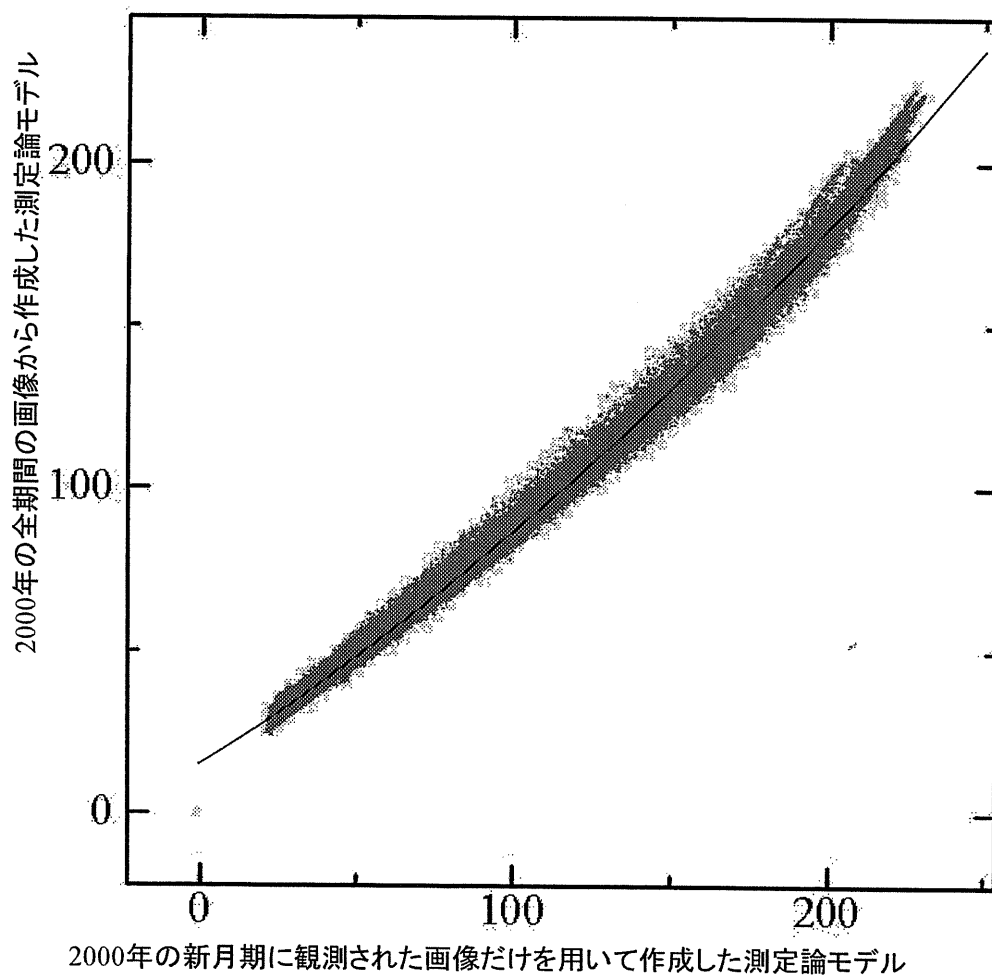
$DN=0$ はデータが欠損していることを意味する。

(2) データの欠落状況

日によっては、日本周辺領域全体を覆うのに十分な観測データが得られておらず、一部領域のデータが欠落している日平均画像もあった。それでも、日本周辺領域の各画素について、1996 年 1 年間の 366 日中の 90%以上に相当する 330~350 日分のデータを得ることができた。

(3) ゲインの下限による飽和について

本論文では、都市光強度が強い場合の飽和に関してのみ分析の対象とし、都市光強度が弱い場合の飽和に関しては議論の対象としていない。これは、都市光強度が強い場合の飽和



図A-1 2000年の新月期に観測された画像だけを用いて作成した測定論モデル

に比べ、都市光強度が弱い場合の飽和の規模がはるかに小さいからである。1996年1年間の中央値が1または2となった画素は存在せず、中央値が3となった画素においても、 $DN=1$ が出現した確率は、12.1%である。それに比べ、中央値が63となった画素において $DN=63$ が出現する確率は62.6%である。

(4) 中央値 $M_e=63$ となる画素について

中央値 $M_e=63$ となる画素は、真の中央値を推定する対象となる画素であるため、図7内では表示していない。

(5) 図6-9~11において割愛した領域

図6-9~11においては、沖ノ鳥島、硫黄島、南鳥島を割愛した。

7. 東海地震の被害想定への適用

(1) 「各レベルの都市圏クラスターに包含される自治体」の定義

ここで、「各レベルの都市圏クラスターに包含される自治体」とは、「各レベルの都市圏クラスターにその市町村庁舎所在地点が包含される自治体」を意味する。

(2) 想定結果に関する留意点

注意しなければならないのは、これらの想定結果は、地震にともなう斜面崩壊、液状化、津波による被害を考慮していない点である。特に南海トラフを震源とする地震はほぼ確実に津波を伴うものと考えられている。その場合には、太平洋沿岸については、揺れによる被害に、津波による被害が加わり、より大きな被害となりうる。

8. GPS 付ビデオカメラと高解像度衛星を用いた建物インベントリーの推定

(1) マリキナ市の概要

マリキナ市は、面積 21.5km^2 、人口約42万人で、メトロマニラ郊外のベッドタウンである。また、フィリピンの製靴産業の中心地としても有名で、現在、マリキナ市は世界の製靴産業の中心地を目指している。

謝 辞

本研究遂行にあたり利用したDMSP/OLS Level 1データは、米国商務省海洋大気庁地球物理データセンター (NOAA/NGDC) より提供され、MAFFIN-SIDaBから配布されたものを利用した。また、H. W. Kroehl博士、C. D. Elvidge博士、V. R. Hobson研究員をはじめとするNOAA-NGDCの研究者には、研修、ワークショップ等を通して、DMSP/OLSデータを扱う上での留意点、本研究へのコメント等、多くの助言を頂いた。DMSP/OLS Level 1データのジオロケーションには、NOAA-NGDCから提供していただいたプログラムを利用させていただいた。

地震被害想定への適用に際しては、永田茂氏 (ERS 株式会社) には、地震外力の推定から被害推定まで被害想定過程全般について、幅広く助言をいただいた。また、水越薫氏 (ERS 株式会社)、大野晋氏、鳥沢一晃氏 (鹿島建設株式会社・技術研究所) には、地震外力評価手法、建物被害・人的被害の推定手法に関して助言をいただくとともに、地震動推定プログラム、推定に必要な諸データを提供していただいた。

情報通信研究機構 宇治 GIS 研究開発支援センターの研究員の方々には、GPS ビデオカメラの使用方法、データの解析に関してご協力いただいた。

東海地震がもたらしうる地震動に関しては、中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」及び「東海地震対策専門調査会」において検討された想定東海地震に係る地震動等の公開データを利用させていただいた。

ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献(アルファベット順)

- 青木 久, 松岡 昌志, 山崎 文雄, 空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出, 写真測量とリモートセンシング, Vol.40, No.4, pp.27-36, 2001.
- Blaikie Piers, Cannon Terry, Davis Ian, Wisner Ben, At Risk natural hazards, people's vulnerability, and disasters, 1994, New York, Routledge.
- 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター : <http://www.edm.bosai.go.jp/>
- Burton Ian, Kates Robert W., White Gilbert F., The Environment As Hazard, 1993, New York, Guilford.
- 中央防災会議・東海地震に関する専門調査会(第7回)説明資料, 2001, 8.
- 中央防災会議・東海地震対策専門調査会, 中央防災会議「東海地震対策専門調査会」(第1回)資料, 2002, 3.
- 中央防災会議・東海地震対策専門調査会, 東海地震に係る被害想定を検討状況について(地震の揺れ等による建物被害、人的被害等)・記者発表資料, 2002, 8.
- 中央防災会議・東南海、南海地震等に関する専門調査会(第7回)説明資料, 2002, 12.
- 中央防災会議・東海地震対策専門調査会, 東海地震に係る被害想定手法について(参考資料), pp.3, 2003.
- 中央防災会議・東海地震対策専門調査会, 東海地震に係る被害想定結果について(記者発表資料), 2003.
- Dobson Jerome E., Bright Edward A., Coleman Phillip R., Durfee Richard C., Worley Brian A., LandScan: A Global Population Database for Estimating Populations at Risk, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.66, No.7, pp.849-857, 2000, 7.
- Eguchi R., Goltz J. D., Seligson H., Heaton T. H., Real-time Earthquake Hazard Assessment in California: the Early Post-earthquake Damage Assessment Tool and the Caltech-USGS Broadcast of Earthquakes, Proceedings of the 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, pp.55-63, 1994.
- Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., Mapping City Lights With Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.63, No.6, pp.727-734, 1997, 6.
- Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihns E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., Davis C.W., Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption, Int. J. Remote Sensing, Vol.18, No.6, pp.1373-1379, 1997.
- Elvidge C.D., Hobson V.R., Baugh K.E., Dietz J.B., Shimabukuro Y.E., Krug T., Novo E.M.L.M., Echavarria F.R., DMSP-OLS estimation of tropical forest area impacted by surface fires in

- Roraima, Brazil 1995 versus 1998, *Int. J. Remote Sensing*, Vol.22, No.14, pp.2661-2673, 2001.
- Elvidge, C. D., et al.: Algorithm for the Retrieval of Fire Pixels from DMSP Operational Linescan System Data, *Global Biomass Burning*, 1995.6.
- Elvidge, C.D. et al: Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlement, *Remote Sensing and Environment*, Vol. 68, pp.77-88, 1999
- NHK 放送文化研究所, データブック 国民生活時間調査 1995, 1995.
- 福島 美光, 田中 貞二, 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 地震学会講演予稿集, No.2, pp.116, 1992.
- 福和 伸夫, 荒川 政知, 西阪 理永, 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定, 構造工学論文集, 44B, pp.77-84, 1998, 3.
- GeoHazards International, United Nations Centre for Regional Development Disaster Management Planning Hyogo Office: Global Earthquake Safety Initiative Pilot Project, Final Report, October 2001
- GSHAP(<http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/>)
- 阪神・淡路大震災神戸市災害対策本部, 阪神・淡路大震災—神戸市の記録 1995 年—, pp.27-31, 1996.
- 長谷川 弘忠, 山崎 文雄, 松岡 昌志, 空撮ハイビジョン映像を用いた兵庫県南部地震による建物被害の目視判読, 土木学会論文集Ⅱ, Vol.56, No.682, pp.177-185, 2001.
- 長谷川 浩一, 翠川 三郎, 松岡 昌志, 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測—その 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例—, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, pp.53-59, 1998, 3.
- 長谷川 浩一, 翠川 三郎, 地域メッシュ統計を利用した広域での非木造建築物群の震害予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 521 号, pp.41-47, 1999, 7.
- 長谷川 浩一, 翠川 三郎, 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測—その 1 建築年代別の木造建築物棟数の推定—, 日本建築学会構造系論文集, 第 497 号, pp.75-80, 1997, 7.
- Kouichi Hasegawa, Haruo Hayashi, Kenneth Topping, Norio Maki, Shigeo Tatsuki, Michiko Banba, Kei Horie, Satoshi Tanaka, Keiko Tamura, Tamiyo Kondo, Yuka Karatani and Yohinobu Fukasawa: INTERACTIVE SEISMIC DAMAGE RISK ASSESSMENT IN MARIKINA CITY, PHILIPPINES, *Proc. Of Asian Conference on Earthquake*, Manila, March 5-6, 2004.
- Hayashi H., Hashitera S., Kohiyama M., Matsuoka M., Maki N., Fujita H., Elvidge C. D., International Collaboration for the Early Damaged Area Estimation System Using DMSP/OLS Nighttime Images, *Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. VI, pp.2697-2699, 2000, 7.

- 林 春男, 率先市民主義 防災ボランティア論 講義ノート, 2001.
- 林 春男, 阪神・淡路大震災における災害対応—社会科学的検討課題, 実験社会心理学研究, 第35巻, 第2号, pp.194-206, 1995, 11.
- 池田 央, 調査と測定 社会科学・行動科学のための数学入門 4, 1980, 9, 東京, 新曜社.
- Imhoff M.L., Lawrence W.T., Elvidge C.D., Tera P., Levine E., Privalsky M.V., Brown V., Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights to Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the United States, Remote Sens. Environ, Vol.59, pp.105-117, 1997.
- Imhoff M.L., Lawrence W.T., Stutzer D.C., Elvidge C.D., A Technique for Using Composite DMSP/OLS City Lights Satellite Data to Map Urban Area, Remote Sens. Environ, Vol.61, pp.361-370, 1997.
- 石橋 克彦, 大地動乱の時代—地震学者は警告する—, 1994, 8, 東京都, 岩波書店.
- 自治省消防庁消防研究所, 簡易型地震被害想定システム ユーザーズガイド 追加マニュアル, 1997, 11, 財団法人 消防科学総合センター.
- 自治省消防庁消防研究所, 簡易型地震被害想定システム ユーザーズガイド, 1996, 8, 財団法人 消防科学総合センター.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 南海トラフの地震の長期評価について, 2001, 9.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会, 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について (中間報告), 2001, 12.
- Kodama, M. and Song, X.: A New Remote Sensing Database System in Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan, 51st International Astronautical Congress, IAF-00-B.4.05, pp. 1-11, 2000.10.
- 小檜山 雅之, 水越 薫, 石田 寛, 永田 茂, 金子 弘幸, 松本 優, 矢代 晴実, 大金 義明, GIS を活用した地震損害評価システムの構築, 日本建築学会技術報告集, 第7号, pp.187-191, 1999, 2.
- 小檜山 雅之, 林 春男, 牧 紀男, 橋寺 晋, 松岡 昌志, ハーバート・W・クレール, クリストファー・D・エルビッジ, V・ルース・ホブソン, DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム(EDES)の開発, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 79-86, 2000.11.
- 小檜山 雅之, 林 春男, 牧 紀男, 東田 光裕, ハーバート・W・クレール, クリストファー・D・エルビッジ, V・ルース・ホブソン, DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム (EDES) の時系列画像法を用いた推定精度の向上, 地域安全学会論文集, No.3, pp.173-180, 2001, 11.
- 小檜山雅之他: DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム (EDES) の開発, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 79-86, 2000.11.
- 小檜山雅之他: DMSP/OLS 夜間観測画像を用いた早期被災地推定システムの開発, EDM

Technical Report, No. 10, 2001.3.

Kohiyama, M., et al.: Validity Study of EDES Application to Taiwan Chi-Chi Earthquake Disaster, Proc. of the 21th Asian Conf. on Remote Sensing, Vol. 1, pp. 407-412, 2000.12.

Konami T., Shibasaki R., Tan G., Using nighttime DMSP/OLS images of Citylights to Estimate Districtlevel Population Distribution in Developing Countries, Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing, pp.Q.21_1-6, 1998, 11.

Konami, T. et al.: Using nighttime DMSP/OLS images of Citylights to Estimate District-level Population Distribution in Developing Countries, Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing, pp.Q21_1-6, 11, 1998

松岡 昌志, 山崎 文雄, 翠川 三郎, 1995 年兵庫県南部地震での被害地域における人工衛星光学センサ画像の特徴, 土木学会論文集□, Vol.54, No.668, pp.177-185, 2001.

松岡 昌志, 翠川 三郎, 国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 443 号, pp.65-71, 1993, 1.

松岡 昌志, 翠川 三郎, 国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 447 号, pp.51-56, 1993, 5.

松岡 昌志, 翠川 三郎, 若松 加寿江, 国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 452 号, pp.39-45, 1993, 10.

松岡 昌志, 翠川 三郎, 若松 加寿江, 国土数値情報を利用した地震時斜面崩壊危険度予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.59-66, 1995, 8.

松岡 昌志, 山崎 文雄, 1995 年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星 SAR 強度画像の特徴, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp.55-61, 2001, 8.

Mileti Dennis S., Disaster by Design, pp.19-30, New York, Routledge.

三浦弘之・翠川三郎: 建物 GIS データの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物自動検出手法, 地域安全学会論文集, No.5, 2003.11

文部科学省 2001 年インド・グジャラート地震調査団: 2001 年インド・グジャラート地震の総合的調査研究, 自然災害科学, Vol. 20, No. 1, pp. 89-102, 2001.5.

内閣府防災局: 地震被害想定支援マニュアル, 2001 (<http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>).

中村 豊, 研究展望: 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集□, Vol.34, No.531, pp.1-33, 1996, 1.

中山裕則 他:DMSP 全球夜間映像の作成と夜の光分布に関する地理学的考察, 日本リモートセンシング学会誌, Vol13, No.4, pp.1-14, 1993

Nakayama, M. and Elvidge, C.D.: Applying Newly Developed Calibrated Radiance DMSP/OLS Data for Estimation of Population, Proceedings of the 20 th Asian Conference on Remote Sensing,

Vol.1, pp.289-293, 11, 1999.

NAMRIA(<http://www.psdn.org.ph/namria/>)

西阪 理永, 福和 伸夫, 荒川 政知, 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度と地震動の予測, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.341-344, 1997.

能島 暢呂, 想定南海地震による被害予測について, 月間地球, 号外 No.24 「南海地震一次の巨大地震に備えて」, pp.198-203, 1999, 3, 海洋出版.

農林水産省農林水産技術会議事務局: 農林水産衛星画像データベースシステム
http://rms1.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/menu_ja.html

農林水産省農林水産技術会議事務局: 衛星観測に関するページ
<http://www.affrc.go.jp/satellite/>

小川 直樹, 山崎 文雄, 航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読, 地域安全学会論文集, No.2, pp.119-128, 2000.

岡田光正: 建築と都市の人間工学 空間と行動のしくみ, p290-291, 鹿島出版会, 1977年6月

大西 淳一, 山崎 文雄, 若松 加寿江, 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集Ⅱ, Vol.48, No.626, pp.79-91, 1997, 7.

大西 淳一, 山崎 文雄, 若松 加寿江, 気象庁地震記録に基づく地盤増幅度と地形分類との関係, 第10回日本地震工学シンポジウム, C4-10, pp.909-914, 1998.

大角恒雄・金子史夫・藤谷秀雄: カトマンズ盆地における地震防災のための建築物インベントリ調査と建物分布, 地域安全学会論文集, No.4, 2002.11

RADIUS(<http://www.geohaz.org/radius/>)

佐伯 琢磨, 坪川 博彰, 汐見 勝彦, 兵庫県南部地震以後の自治体の地震被害想定に関する調査, 地域安全学会論文集, No.1, pp.165-172, 1999, 11.

斉藤郁雄・朴明浩・石原修: ランドサット TM データによる土地被覆変化の抽出に関する研究, 日本建築学界計画系論文集, No.561, 79-84, Nov., 2002

産業復興会議, 産業復興計画, 1997, 6.

佐藤 良輔, 安部 勝征, 岡田 義光, 島崎 邦彦, 鈴木 保典, 日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 1989, 3, 東京, 鹿島出版会.

損害保険料率算定会, 地震被害想定資料集, 地震保険調査報告, Vol.28, 1998, 9.

総務庁, 平成7年国勢調査(その1及びその2)地域メッシュ統計

Sutton P., Roberts D., Elvidge C.D., Meij H., A Comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for the Continental United States, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.63, No.11, pp.1303-1313, 1997, 11.

Sutton P., Modeling Population Density with Night-time Satellite Imagery and GIS,

Comput. Environ. and Urban Systems, Vol.21, No.3/4, pp.227-244, 1997.

Sutton P., Roberts D., Elvidge C.D., Baugh K.E., Census from Heaven -an estimate of the global human population using night-time satellite imagery, Int. J. Remote Sensing, Vol.22, No.16, pp.3061-3076, 2001.

高島 正典, 林 春男, 河田 恵昭, 自然災害による総被害の推定手法の構築—雲仙普賢岳噴火災害を事例として—, 第16回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.165-166, 1997, 10.

高島 正典, 林 春男, 広域地震災害における復旧・復興状況の時空間的な推移—阪神・淡路大震災を事例として—, 地域安全学会論文集, No.1, pp.1-8, 1999, 11.

高島 正典, 林 春男, 電力消費量時系列データを利用した復旧・復興状況の定量的把握手法—阪神・淡路大震災への適用—, 自然災害科学, Vol.18, No.3, pp.355-367, 1999.

高島 正典, 林 春男, DMSP 夜間可視画像を用いた広域都市圏の同定と地震被害ポテンシャルの推定, 地域安全学会論文集, No.4, pp.151-158, 2002, 11.

高島 正典, 林 春男, 地震被害ポテンシャル推定のための DMSP 夜間可視画像を用いた都市光分布の測定論モデル作成手法の提案—人口推定への適用—, 地域安全学会論文集, No.3, pp.101-108, 2001, 11.

高島 正典, 林 春男, DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた被災地推定の妥当性の検証—トルコ・マルマラ地震 (1999) 及び阪神・淡路大震災 (1995) への適用—, 地域安全学会論文集, No.2, pp.69-78, 2000, 11.

The Frontier Post, <http://frontierpost.com.pk/main.asp?id=8&date1=1/28/2001> (2001 年 1 月 28 日のインターネット情報)

Tierney Kathleen J., Lindell Michael K., Perry Ronald W., Facing the Unexpected Disaster Preparedness and Response in the United States, 2001, Washington, D.C., Joseph Henry Press.

豊田 利久, 河内 朗, 阪神・淡路大震災による産業被害の推定, 国民経済雑誌, 第 176 巻, 第 2 号, pp.1-15, 1997.

United Nations/International Strategy for Disaster Reduction, Disaster Reduction and Sustainable Development: understanding the links between vulnerability and risk related to development and environment, Background document for the World Summit on Sustainable Development(WSSD) No 5 revised version 17, 2002, 5.

宇佐美 龍夫, 新編日本被害地震総覧, 1996, 8, 東京, 東京大学出版会.

Welch, R: Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns From Satellite Data, Remote Sensing of Environment, Vol.9, pp.1-9, 1980

山崎 文雄, リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集Ⅱ, Vol.41, No.577, pp.1-16, 1997, 10.

財団法人地震予知総合研究振興会地震調査研究センター, 平成 9 年度科学技術庁委託 強震動評価手法のレビューと事例的検討 報告書, 1998, 3.

財団法人日本気象協会, 地域防災計画における津波対策強化の手引き・別冊 津波災害予測マニュアル, 1997, 3.

座間 信作, 遠藤 真, 細川 直史, 畑山 健, 簡易型地震被害想定システムの改良, 消防研究所報告, 第 90 号, pp.1-10, 2000.

主要発表論文

以下、本研究における業績の中で主要な9篇の論文を収録する。なお、本研究以前から我々の研究グループで実施してきた関連研究6編(*)もあわせて収録した。DMSP画像の防災への利用に関する一連の研究の資料集としてお使いいただければ幸いである。
収録されている論文は以下の通りである。

- Masasuke TAKASHIMA, Haruo HAYASHI, Improvement of The Method to Estimate Relative Night-time City Light Intensity of The Highly Urbanized Area Considering The Fluctuation Of Observed Digital Number in DMSP Visible Imagery, Proceedings of The 25th Asian Conference on Remote Sensing, No25, pp.644-649, 2004.
- Manabu WATANABE, Haruo HAYASHI, Masasuke TAKASHIMA et al., Development Of a Seismic Risk Assessment Method By Estimating Building Inventory Using High Resolution Satellite Imagery Data And Digital Video Imagery Data with Geo-Locational Data, Proceedings of The 25th Asian Conference on Remote Sensing, No25, pp.250-255, 2004.
- 高島 正典・林 春男, DMSP 夜間可視画像における画素単位の観測値分布を考慮した都市光強度推定手法の提案, 地域安全学会論文集, No.6, pp.85-94, 2004.
- 渡邊 学・林 春男・高島 正典他, 地震災害の被害想定のための高解像度衛星画像・GPS ビデオカメラを用いた建物インベントリー推定手法の確立ーフィリピンのマリキナ市を事例としてー, 地域安全学会論文集, No.6, pp.75-84, 2004.
- Masasuke TAKASHIMA, Haruo HAYASHI, Damage Inventory Estimation For Large Scale Earthquake Disaster Assessment Using Night Time City Light, Proc. of The 13th World Conference of Earthquake Engineering, CD-ROM, 2004.
- M.Kohiyama, H.Hayashi et al., Early damaged area estimation system using DMSP-OLS night-time imagery, Int. J. REMOTE SENSING, Vol.25, No.11, pp.2015-2036, 2004.
- M.Takashima, H. Hayashi, S. Nagata, Monitoring Spatial Distribution of Population and Buildings using DMSP Night-time Imagery and Its Application for Earthquake Damage Assessment, Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, No27, CD-ROM 版, 2003.
- 高島 正典, 林 春男, 夜間都市光分布を用いた広域の人口・建物棟数分布のモニタリングー東海地震の被害想定への適用ー, 土木学会地震工学論文集, Vol.26, CD-ROM 版, 2003.
- 高島 正典, 林 春男, DMSP 夜間可視画像を用いた広域都市圏の同定と地震被害ポテンシャルの推定, 地域安全学会論文集, No.4, pp.151-158, 2002.
- 高島 正典, 林 春男, 地震被害ポテンシャル推定のための DMSP 夜間可視画像を用いた都市光分布の測定論モデル作成手法の提案ー人口推定への適用ー, 地域安全学会論文集, No.3, pp.101-108, 2001.
- 小檜山雅之 他, DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム (EDES) の時系列画像法を用いた推定精度の向上, 地域安全学会論文集, No.3, pp. 173-180, 2001.
- M. Takashima, H. Hayashi, Earthquake Damaged Area Estimation Using DMSP/OLS Night-time ImageryーApplication for Hanshin-Awaji Earthquakeー, Proc. of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol.1, pp.336-338, 2000.
- 高島 正典, 林 春男, DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた被災地推定の妥当性の検証ートルコ・マルマラ地震(1999)及び阪神・淡路大震災(1995)への適用ー, 地域安全学会論文集, No.2, pp.1-8, 2000.
- Kohiyama, M., et al.: Validity Study of EDES Application to Taiwan Chi-Chi Earthquake Disaster, Proc. of the 21th Asian Conf. on Remote Sensing, Vol. 1, pp. 407-412, 2000.
- 小檜山雅之 他: DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム (EDES) の開発, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 79-86, 2000.